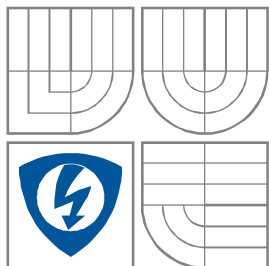


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PŘESNÁ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

PRECISE MEASUREMENT OF SEMICONDUCTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

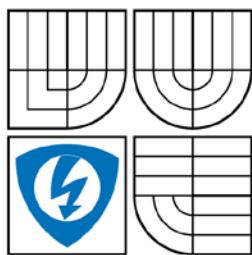
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Smělík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Smělík

ID: 72892

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Přesná měření vlastností polovodičových součástek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s měřením vlastností polovodičových součástek. Zaměřte se zejména na měření stálosti výstupních parametrů. Na základě studia navrhnete laboratorní pracoviště pro přesná měření vlastností polovodičových součástek, součástí tohoto laboratorního pracoviště bude také termostát, který bude proměřovanou součástku zahřívat. Realizujte vámi navržené laboratorní pracoviště jako laboratorní úlohu. Součástí navrženého přípravku musí být také PC rozhraní (nejlépe USB), kterým bude laboratorní přístroj ovládán.

Vámi navrženou laboratorní úlohu zautomatizujte s použitím ovládacího prostředí VEE od firmy Agilent. Vytvořený program opatřete stručným leč výstižným návodem, aby mohl posloužit jako podklady pro laboratorní úlohu pro laboratorní cvičení předmětu Radioelektronická měření. Následně proveďte měření stálosti parametrů vámi vybraných polovodičových součástek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ČEJKA, M., MATYÁŠ, V. Elektronická měřicí technika. Brno: Vutium 1999. 141 s. ISBN: 80-214-1336-0.

[2] KAINKA, B. Měření, řízení a regulace pomocí PC. Praha: BEN - technická literatura, 2003. 272 s. ISBN 80-7300-089-X.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout laboratorní pracoviště pro přesná měření stálosti výstupních parametrů polovodičových součástek. Součástí je také termostat, který udržuje konstantní teplotu proměřované součástky. Celý laboratorní přípravek je ovládán pomocí počítače přes rozhraní USB. Na počítači je vytvořen program v ovládacím prostředí Agilent VEE pro automatizované měření těchto polovodičových součástek.

Klíčová slova:

Polovodičová součástka, termostat, mikrokontrolér, automatické měření, Agilent VEE, USB

Annotation

The aim of this bachelor's thesis was design a laboratory workplace for precise measurement of the stability output parameters of semiconductors. The thermostat is also part of this workplace. The thermostat is maintaining a constant temperature measured semiconductor. The entire laboratory preparation is controlled by a computer via USB. The program is created in control environment Agilent VEE for automatic measurement that semiconductor components.

Keywords:

Semiconductor component, thermostat, microcontroller, automatic measurement, Agilent VEE, USB

Bibliografická citace

SMĚLÍK, M. *Přesná měření vlastností polovodičových součástek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 37 s. 4 příl. Vedoucí semestrální práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Přesná měření vlastností polovodičových součástek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

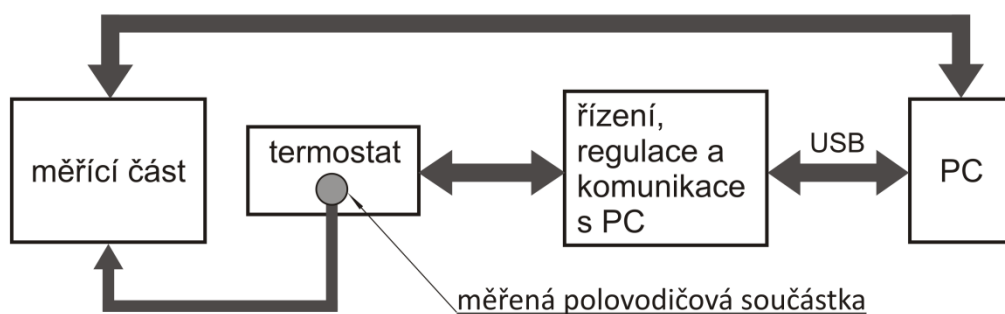
Obsah:

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Měřicí část | 2 |
| 2.1 Měření polovodičů | 2 |
| 2.1.1 Polovodiče..... | 2 |
| 2.1.2 Tranzistor | 3 |
| 2.1.3 Měřené parametry tranzistoru | 4 |
| 2.1.4 Vliv teploty na stálost parametrů tranzistoru | 7 |
| 2.2 Návrh měřicí části laboratorního pracoviště | 8 |
| 2.2.1 Popis samotného měření..... | 10 |
| 3 Termostat | 12 |
| 3.1 Princip termostatu | 12 |
| 3.2 Návrh termostatu..... | 12 |
| 3.3 Realizace termostatu..... | 13 |
| 4 Řízení, regulace a komunikace s PC | 15 |
| 4.1 Rozhraní USB..... | 15 |
| 4.2 Mikrokontrolér..... | 16 |
| 4.2.1 Návrh mikrokontroléru | 16 |
| 4.3 D/A převodník..... | 17 |
| 4.3.1 Návrh D/A převodníku..... | 17 |
| 4.4 Realizace Řízení, regulace a komunikace s PC | 18 |
| 4.4.1 Realizace mikrokontroléru..... | 18 |
| 4.4.2 Návrh a realizace desky plošných spojů | 18 |
| 5 Osobní počítač | 21 |
| 5.1 Návrh použití PC..... | 21 |
| 5.1.1 Agilent VEE | 21 |
| 5.2 Realizace programu ve VEE..... | 21 |
| 5.2.1 Popis programu ve VEE | 22 |
| 5.2.2 Seznam příkazů pro ovládání měřicích přístrojů ve VEE a jejich použití..... | 22 |
| 6 Laboratorní pracoviště | 24 |
| 6.1 Návrh celkového zapojení laboratorního pracoviště | 24 |
| 6.2 Popis činnosti laboratorního pracoviště | 25 |
| 6.3 Návod pro měření | 25 |

| | |
|---|----|
| 7 Výsledky měření..... | 26 |
| 7.1 Výsledky měření pro teplotu 25°C: | 27 |
| 7.2 Výsledky měření pro teplotu 35°C: | 28 |
| 7.3 Výsledky měření pro teplotu 50°C: | 29 |
| 7.4 Výsledky měření pro teplotu 60°C: | 30 |
| 7.5 Výsledky měření pro teplotu 75°C: | 31 |
| 7.6 Výsledky měření pro teplotu 90°C: | 32 |
| 8 Závěr..... | 33 |
| 9 Seznam literatury..... | 34 |
| 10 Seznam příloh | 35 |
| 11 Seznam zkratk | 36 |

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací laboratorního pracoviště, které bude určeno jako laboratorní úloha pro přesná měření vlastností polovodičových součástek. Jedná se především o stálost výstupních parametrů. To znamená, že se budou měřit voltampérové charakteristiky polovodičových součástek v závislosti na teplotě a bude nutné zajistit konstantní teplotu měřené součástky po celou dobu měření jedné kompletní voltampérové charakteristiky. Po jejím změření dojde k nastavení teploty měřené součástky na jinou hodnotu a opětovnému změření charakteristik. Tím vznikne soubor voltampérových charakteristik dané polovodičové součástky, který bude zcela zřetelně a přehledně ukazovat, jak daná součástka mění své vlastnosti s teplotou. Celé měření bude zcela automatické, kdy uživatel pouze zadá rozsah teplot pro měření. Jak můžeme vidět na obr. 1.1, celé pracoviště bude rozděleno na čtyři vzájemně propojené části.



Obr. 1.1 Blokové schéma laboratorního pracoviště.

Blok nazvaný měřicí část bude zajišťovat samotné měření požadovaných voltampérových charakteristik. Bude složen z regulovatelných zdrojů napětí, které budou zajišťovat napájení měřené polovodičové součástky a budou dodávat požadovaný proud, který jí bude protékat. Dále pak zde budou zapojeny měřicí přístroje, které budou měřit napětí a proudy měřené součástky. Další blok se jmenuje termostat, jehož úkolem je udržovat konstantní teplotu měřené polovodičové součástky a na příkaz z PC tuto teplotu změnit. A zároveň bude měřit aktuální teplotu a posílat ji zpět do PC. Toto spojení mezi termostatem a PC bude zajišťovat blok nazvaný řízení, regulace a komunikace s PC. Tento blok bude mít také na starosti udržování konstantní teploty na měřené polovodičové součástce. Bude složen z jednočipového počítače neboli mikrokontroléru, který bude propojen s PC pomocí rozhraní USB. Dále bude PC řídit všechny měřicí přístroje a zpracovávat naměřené hodnoty. Vše bude zajišťovat vývojové prostředí VEE (Visual Engineering Environment) od společnosti Agilent.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout všechny tyto bloky, zajistit jejich vzájemnou komunikaci, celé toto laboratorní pracoviště realizovat a sestavit stručný a výstižný návod pro měření, který bude sloužit pro laboratorní cvičení předmětu Radioelektronická měření. Následující kapitoly se zabývají teoretickým úvodem, návrhem dané části a jeho realizací vždy postupně po jednotlivých blocích laboratorního pracoviště. Nebudu se příliš zabývat teoretickými poznatky, protože daná témata jsou velmi obsáhlá.

2 Měřicí část

2.1 Měření polovodičů

2.1.1 Polovodiče

Polovodič je podle definice [1] pevná látka, která se za určitých podmínek chová jako elektricky vodivý materiál nebo jako elektrický izolant. Jednou z podmínek může být dodání energie, kterou řadíme do vnějších podmínek. Může se jednat o energii elektrickou, tepelnou nebo světelnou. Vedle těchto podmínek existují také podmínky vnitřní, kdy se přidá k prvku polovodiče jiný prvek, tzv. příměs. Těmito podmínkami ovlivňujeme elektrické vlastnosti polovodičů tak, že jim měníme jejich vnitřní elektrický odpor. Základní polovodičové prvky jsou křemík a germanium, které se používají v elektrotechnice nejčastěji. Dále může být polovodičem sloučenina, například arsenid galia (GaAs). Těchto sloučenin je v dnešní době již objeveno mnoho a zdokonalují vlastnosti, které nemohou prvky jako křemík a germanium dosáhnout.

U polovodičů známe dva druhy vodivosti a to je vodivost vlastní a nevlastní. Vlastní vodivost je založena na takovém principu, že u polovodiče není použita příměs a jedná se o čistý prvek polovodiče tzv. krystal. Při teplotě 0 °K (-273,15 °C) jsou všechny čtyři valenční elektrony jednoho atomu v pevné vazbě s okolními atomy krystalické mřížky a žádné se volně nepohybují, což je podmínka vzniku elektrického proudu. Proto se chová polovodič při těchto podmínkách jako izolant s nekonečně velkým elektrickým odporem. Při zvýšení teploty začnou atomy polovodiče kmitat a některé elektrony se z valenčního pásu dostanou přes zakázaný pás do vodivostního pásu a budou se volně pohybovat mezi atomy v krystalické mřížce. Atom, který takto ztratí elektron, bude mít větší převahu kladně nabitých částic a vznikne tzv. defektní elektron, zkráceně nazývaný jako díra. Tento děj vzniku volného elektronu a díry se nazývá generace elektrického náboje. Takto volné elektrony jsou již schopné umožnit vznik elektrického proudu v polovodičích. Počet takto získaných volných elektronů je ale malý, aby mohly téct polovodiči větší proudy. Čím více se bude zvyšovat teplota, tím více bude růst počet volných elektronů a klesat elektrický odpor. Tady máme jasný důkaz, jak je polovodičový prvek, ze kterého jsou polovodičové součástky vyrobeny, závislý na teplotě.

Abychom docílili většího počtu volných nosičů náboje a tím i většího elektrického proudu, který může polovodičem protékat, přidáme do krystalu příměs a tím vznikne polovodič s nevlastní vodivostí. Podle toho, kolik valenčních elektronů prvek příměsi obsahuje, dělíme polovodiče na dva typy. Polovodič typu N a polovodič typu P. Pokud obsahuje příměs pět valenčních elektronů, zůstane vždy po kovalentní vazbě jednoho atomu příměsi jeden elektron volný, protože polovodičové prvky mají vždy čtyři valenční elektrony. Tímto nadbytkem volných elektronů vznikne polovodič typu N.

Pokud ale tvoří příměs prvek se třemi valenčními elektrony, vždy jeden elektron v kovalentní vazbě atomu příměsi chybí a na jeho místě vznikne defektní elektron neboli díra. Tímto nedostatkem elektronů a přebytkem děr vznikne polovodič typu P. Jak je patrné z předchozích vět, je u polovodiče typu N zastoupeno více volných elektronů, to znamená, že jsou elektrony majoritní nosiče náboje a díry minoritní nosiče náboje. U polovodiče typu P je to přesně naopak.

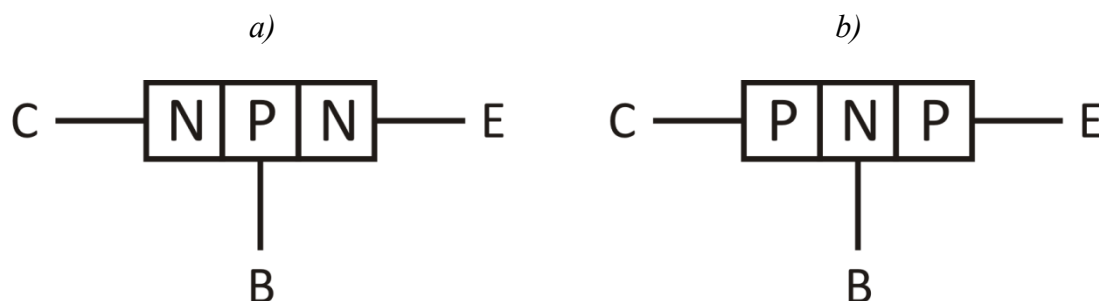
Tyto dva typy polovodičů jsou základem pro všechny polovodičové součástky, u kterých se využívá přechodu mezi jednotlivými typy polovodiče. Přechod PN, jak se toto

spojení různých druhů polovodiče nazývá, je základní princip tranzistorového jevu, který je popsán v následující podkapitole. Mezi základní polovodičové součástky patří dioda, která má jeden přechod PN a bipolární tranzistor, který má přechody PN dva.

2.1.2 Tranzistor

Tranzistor je nejpoužívanější polovodičová součástka vůbec. Základními typy tranzistoru jsou bipolární a unipolární. Ve své bakalářské práci budu provádět měření pouze na bipolárních tranzistorech, protože jsou svou jednoduchou strukturou velmi názorné a přehledné při analýze jejich chování při provozu, což plně dostačuje požadavku měření stálosti výstupních parametrů polovodičových součástek a proto jsou vhodné k měření a zhodnocení jejich vlivu na teplotě. V teoretickém úvodu se proto zaměřím pouze na ně.

Bipolární tranzistor je tvořen dvěma přechody PN. Podle toho jak jsou jednotlivé typy polovodiče seřazeny, dělíme bipolární tranzistory na NPN a PNP. Tranzistor má tři vývody označené jako báze (B), kolektor (C) a emitor (E), obr. 2.1.



Obr. 2.1 Struktura tranzistoru a) tranzistor typu NPN b) tranzistor typu PNP.

Velmi zjednodušeně můžeme říct, že princip činnosti bipolárního tranzistoru je založený na tom, že proudem do báze, řídíme proud tekoucí kolektorem a emitorem. Podle toho jak polarizujeme jednotlivé přechody PN získáme čtyři různé režimy činnosti tranzistoru. Jen ve zkratce, jsou to tyto:

- závěrný – nevodivý;
- normální aktivní;
- inverzní aktivní;
- saturace.

V mém měření bude tranzistor pracovat v režimu normální aktivní, při maximálních hodnotách kolektorového proudu se dostaneme do režimu saturace neboli nasycení. Režim normální aktivní je používán pro tranzistory jako zesilovací součástky a režim nasycení je používán pro tranzistory jako spínací součástky.

Mezi základními elektrické veličiny bipolárního tranzistoru patří kolektorový proud I_C , proud tekoucí do báze I_B , součet těchto dvou proudů je proud vytékající z emitoru I_E . Ale jelikož je I_B o několik řádů menší než I_C , lze považovat emitorový proud stejně velký jako proud kolektorový. Dále sem patří napětí mezi bází a emitorem U_{BE} a napětí mezi kolektorem a emitorem U_{CE} . Tyto čtyři veličiny stačí k tomu, abych určil celou voltampérovou charakteristiku. U každého tranzistoru jsou výrobcem také uváděny parametry tranzistoru. Jsou zde i uvedeny neelektrické parametry, těmi nejdůležitějšími neelektrickými parametry jsou údaje o teplotách a ztrátových výkonech tranzistoru. Příklad základních parametrů

tranzistoru a jejich typických hodnot je uveden v tab. 2.1 [2]. Jedná se o tranzistor BC549B a jeho mezní hodnoty.

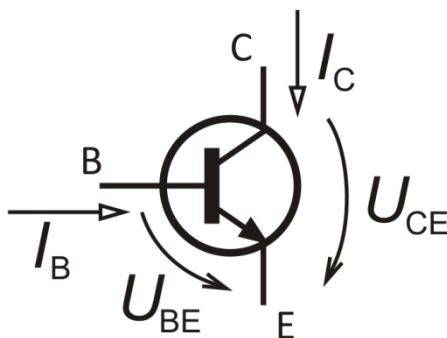
Tab. 2.1 Příklad základních parametrů tranzistoru.

| Symbol | Parametr | Podmínka | Min. | Max. | Jednotka |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|------|------|----------|
| U_{BEO} | napětí kolektor-báze | otevřený emitor | - | 30 | V |
| U_{CEO} | napětí kolektor-emitor | otevřená báze | - | 30 | V |
| U_{BEO} | napětí báze-emitor | otevřený kolektor | - | 5 | V |
| I_C | stejnoseměrný proud kolektoru | | - | 100 | mA |
| I_{CM} | špičkový proud kolektoru | | - | 200 | mA |
| I_{BM} | špičkový proud báze | | - | 200 | mA |
| P_{TOT} | celkový vyzářený výkon | $T_{AMB} \leq 25\text{ °C}$ | - | 500 | mW |
| T_{STG} | skladovací teplota | | -65 | 150 | °C |
| T_J | teplota přechodu | | - | 150 | °C |
| T_{AMB} | pracovní teplota okolí | | -65 | 150 | °C |

Tyto parametry nám říkají, jaké hodnoty proudů a napětí nesmíme při provozu daného tranzistoru překročit. Nebo v jakých teplotách jsou tranzistory schopny pracovat a jaký výkon se při jejich provozu promění v teplo. Těchto parametrů budu využívat při návrhu měření tranzistoru a také podle nich měřený tranzistor vybírat. Některé parametry jsou podrobněji vysvětleny v kap. 2.1.3.

2.1.3 Měřené parametry tranzistoru

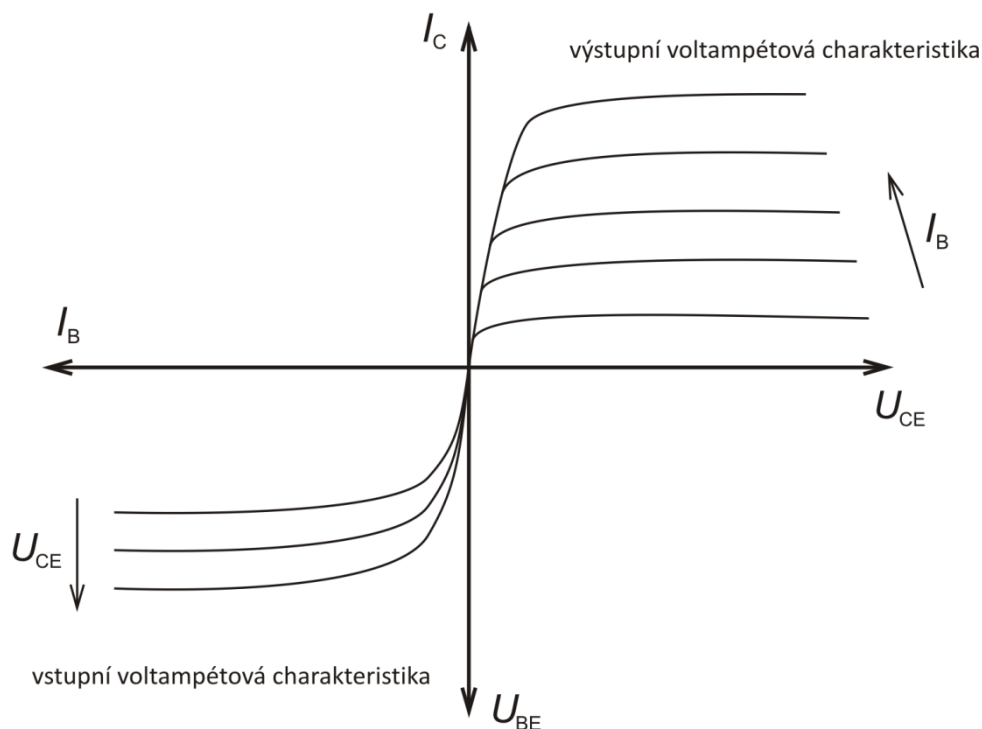
Každý tranzistor je charakterizován určitými parametry. Tyto parametry v zásadě dělíme na statické a dynamické. V této semestrální práci jsem se zaměřil pouze na statické parametry, které jsou reprezentovány voltampérovými charakteristikami. Na nich je zřetelně patrný vliv teploty na tyto součástky. To znamená, že při určování těchto charakteristik budeme potřebovat změřit čtyři základní veličiny tranzistoru, tj. proud báze, napětí mezi bází a emitorem, proud kolektoru a napětí mezi kolektorem a emitorem. Měřený tranzistor bude typu NPN, v zásadě nezáleží na tom, jaký typ bipolárního tranzistoru použiji pro měření, proto jsem bez jakéhokoliv zdůvodňování zvolil typ NPN. Při měření bude tranzistor zapojen jako dvojbran se společným emitorem. Toto zapojení je používané nejčastěji. Jednotlivé měřené veličiny jsou znázorněny na obr. 2.2, který představuje schematickou značku tranzistoru NPN a k ní zakreslené jednotlivé elektrické veličiny.



Obr. 2.2 Měřené veličiny tranzistoru.

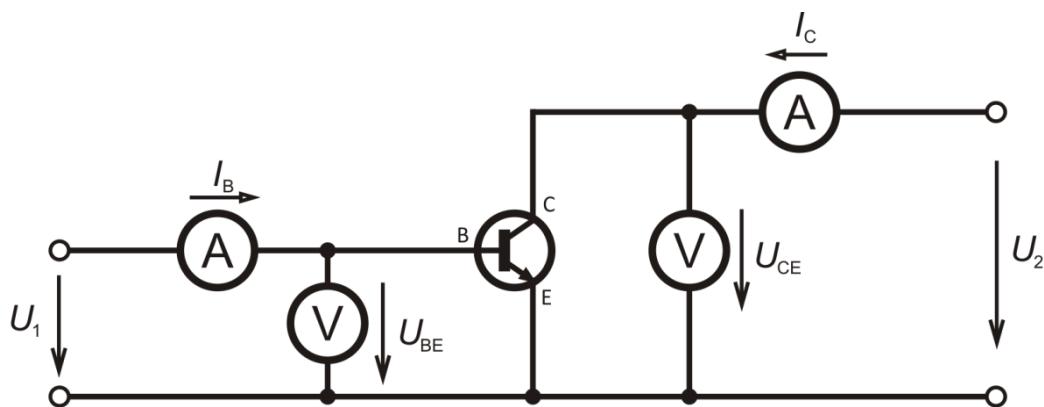
Z těchto změřených veličin pak jsme schopni sestavit voltampérovou charakteristiku. Podle zadání se mám zaměřit na výstupní parametry, čili na výstupní voltampérovou charakteristiku tranzistoru.

Výstupní voltampérová charakteristika je závislost kolektorového proudu na napětí mezi kolektorem a emitorem při konstantním proudu do báze nebo při konstantním napětí mezi bází a emitorem. Pro úplnost ještě uvedu, že existuje také vstupní voltampérová charakteristika, která je popsána jako závislost proudu báze na napětí mezi bází a emitorem při konstantním napětí mezi kolektorem a emitorem. Tuto charakteristiku však měřit nebudu. Tyto charakteristiky se pak vynášejí do jednoho grafu (obr. 2.3).



Obr. 2.3 Příklad voltampérové charakteristiky tranzistoru.

Při měření budu proto potřebovat dva voltmetry pro měření napětí, dva ampérmetry pro měření proudů a dva regulovatelné zdroje stejnosměrného napětí. Principiální schéma zapojení zdrojů a měřicích přístrojů je zobrazeno na obr. 2.4, kde napětí U_1 je napětí prvního zdroje a napětí U_2 je napětí druhého zdroje. V tomto schématu nejsou ještě zapojeny rezistory, které jsou nutné pro nastavení pracovního bodu tranzistoru, které je nezbytné pro správné měření. Návrh těchto rezistorů je uvedeno v kap. 2.2.



Obr. 2.4 Schéma zapojení měřicích přístrojů a regulovatelných zdrojů.

Princip měření je zcela jednoduchý. Výstupní charakteristiku změřím tak, že nastavím zdrojem U_1 proud I_B , který udržuji na konstantní hodnotě. Zdrojem U_2 nastavuji napětí U_{CE} a odečítáme hodnoty I_C . Po dosažení maximálního proudu I_C nebo maximálního napětí U_{CE} získáme první část výstupní charakteristiky. Poté změním proud I_B na jinou konstantní hodnotu a opět nastavuji pomocí zdroje U_2 napětí U_{CE} a odečítáme proud I_C . Opakováním výše popsaného postupu získáme kompletní výstupní charakteristiku tranzistoru pro námi zvolené konstantní hodnoty I_B .

Tyto charakteristiky pak využijeme při určování dalších důležitých parametrů tranzistoru a to jsou hybridní parametry. Definice těchto parametrů vznikly za předpokladu, že lze uvažovat tranzistor jako lineární dvojbran a tento dvojbran lze popsat pomocí dvojice nelinearizovaných rovnic. Rovnice (1) a (2) představují hybridní rovnice pro tranzistor zapojený se společným emitorem

$$u_{BE} = h_{11e} \cdot i_B + h_{12e} \cdot u_{CE}; \quad (2.1)$$

$$i_c = h_{21e} \cdot i_B + h_{12e} \cdot u_{CE}. \quad (2.2)$$

Z těchto rovnic pak můžeme určit jednotlivé h-parametry. Parametr h_{11e} určíme tak, že v první rovnici za u_{ce} dosadíme nulu a určíme parametr h_{11e} . Parametr h_{12e} určíme obdobně tak, že v první rovnici dosadíme za i_b nulu a určíme tak parametr h_{12e} . Stejným principem určíme i další h-parametry z druhé rovnice. Přehled všech parametrů a jejich význam je uveden v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Přehled a význam hybridních parametrů.

| Parametr | Fyzikální význam parametrů |
|---|---|
| $h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$ při $U_{CE} = \text{konst.}$ | vstupní odpor při výstupu nakrátko |
| $h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$ při $I_B = \text{konst.}$ | zpětný napěťový zesilovací činitel při vstupu naprázdno |
| $h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ při $U_{CE} = \text{konst.}$ | proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko |
| $h_{22e} = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{CE}}$ při $I_B = \text{konst.}$ | výstupní vodivost při vstupu naprázdno |

Určování h-parametrů z voltampérových charakteristik je stejné jako při určování dynamického odporu nelineárních součástek. To znamená za pomoci 1. derivace funkce v požadovaném bodě.

H-parametry tranzistoru jsou jakousi zjednodušenou formou vyjádření vlastností dané součástky. Proto se také objevují mezi základními parametry tranzistoru, které výrobci polovodičových součástek udávají v katalogových listech. Tyto parametry, protože vycházejí z napětí a proudů dané součástky, jsou také závislé na teplotě. Měření těchto závislostí je předmětem mé bakalářské práce, proto budu také měřit vliv teploty na závislost h_{21e} na I_C .

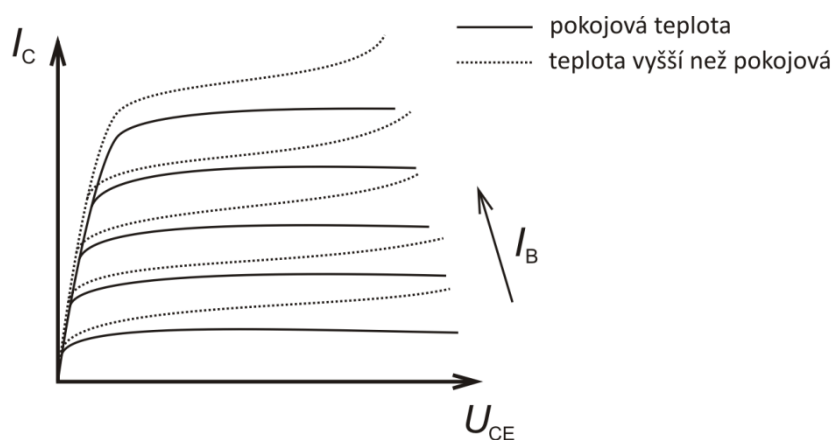
2.1.4 Vliv teploty na stálost parametrů tranzistoru

Jak je zřejmé z teorie polovodičů, jsou polovodičové součástky závislé na teplotě. Se změnou teploty se také mění jejich vlastnosti. Se vzrůstající teplotou roste vlastní vodivost polovodičů, což znamená, že se zvyšuje počet volných nosičů náboje. Toto zvyšování počtu nábojů je způsobeno zvýšením kmitání atomů a to může způsobovat uvolnění některých kovalentních vazeb a tím uvolněním elektronů z valenčního pásu do vodivostního. Existuje několik vlivů teploty na vlastnosti tranzistoru. Uvedu jen ty nejdůležitější.

Se vzrůstající teplotou roste zbytkový proud tranzistoru I_{CB0} , což je proud, který teče mezi bází a kolektorem při odpojení emitoru. Tento proud je nežádoucí při provozu tranzistoru, proto také není žádoucí, aby se dále zvyšoval se zvyšující teplotou.

Další vliv je, že se zvyšující se teplotou klesá napětí mezi bází a emitorem. To znamená, že při zvyšování teploty klesá prahové napětí U_{BE} , což způsobuje dřívější otevírání tranzistoru a rychlejší nárůst kolektorového proudu, což je také nežádoucí vlastnost. Zvyšující se kolektorový proud více zahřívá tranzistor, který se tím více otvírá a následně zvyšuje proud I_C . Aby nedošlo k přehřátí a zničení tranzistoru, musí se toto nekontrolované zvyšování kolektorového proudu nějakým způsobem ošetřit. Existuje mnoho řešení, jak tomu zabránit. Ideální se jeví zapojení tranzistoru do kompenzačního stabilizačního obvodu, kdy je v obvodu připojena teplotně závislá součástka (termistor, dioda) tak, aby její změny vlastností kompenzovaly teplotní závislost tranzistoru. V ideálním případě by se měl tranzistor otvírat při stále stejném napětí U_{BE} bez vlivu na teplotě.

Posledním důležitým vlivem teploty na tranzistor je změna výstupních voltampérových charakteristik se zvyšující se teplotou. Příklad změny je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Příklad změny výstupní voltampérové charakteristiky na teplotě.

Takto změněná voltampérová charakteristika zvyšuje nelinearitu tranzistoru a také mění h-parametry tranzistoru, což je nežádoucí vlastnost.

Z výše uvedených vlivů teploty na vlastnosti tranzistoru je patrné, že zvyšování teploty zhoršuje celkové vlastnosti tranzistoru a proto by se měli provozovat tranzistory při nízkých přibližně pokojových teplotách.

Při měření závislosti teploty na vlastnostech tranzistoru musíme brát v úvahu také fakt, že každý tranzistor, při své činnosti vyzařuje v teplo proměněnou energii. Každý tranzistor má dané kolik této energie je schopen vyžárat, aniž by došlo k jeho zničení. Při mém měření však budu schválně zvyšovat teplotu okolí tranzistoru, abychom zjistili, jak mění své vlastnosti. Proto budu muset stále kontrolovat maximální dovolenou kolektorovou ztrátu, aby nedošlo ke zničení tranzistoru, výpočet tohoto parametru pro měření je uveden v kap. 2.2.

Měření vlivu na teplotě bude probíhat tak, že pro konstantní teplotu tranzistoru změřím celou výstupní voltampérovou charakteristiku a závislost h_{21e} na I_C . A toto měření budu provádět pro několik hodnot teplot okolí tranzistoru.

2.2 Návrh měřicí části laboratorního pracoviště

Jako polovodičovou součástku, která bude sloužit jako měřená, jsem vybral tranzistor BC549B. Je to typický NPN tranzistor, který plně dostačuje potřebě změřit závislost výstupních parametrů na teplotě. Je umístěn v pouzdře TO92 a jeho parametry jsou následující: maximální napětí U_{CE} je 30 V, maximální napětí U_{BE} je 5 V, maximální kolektorový proud je 100 mA, špičkově 200 mA, maximální teplotní rozsah okolí při provozu tranzistoru je od -65 °C do 150 °C a celkový ztrátový výkon při teplotách menších než 25 °C je 500 mW.

Pro měření charakteristik tranzistoru je nutné nastavit tranzistoru pracovní bod. To se provádí tak, že připojíme k tranzistoru rezistory, které pracovní bod nastaví. Zapojení těchto rezistorů je znázorněno na obr. 2.7. Na začátku návrhu je nutné určit parametry pracovního bodu. Já jsem je stanovil následovně: $U_{2max} = 13$ V, $I_C = 30$ mA, $U_{1max} = 2$ V, $U_{BE} = 0,604$ V a $U_{CE} = 4$ V. Dále je nutné znát údaj h_{21e} , který je uveden ve specifikacích tranzistoru: $h_{21e} = 270$. Podle parametrů, které měřený tranzistor může dosahovat, jak je uvedeno v předchozím odstavci, se zdá, že jsou tyto proudy a napětí zbytečně nízké. Je nutné si však uvědomit, že při vyšších teplotách nelze dosahovat tak vysokých proudů z důvodu ztrátového tepla, proto jsem zvolil nižší hodnoty. Pro výpočty hodnot rezistorů R_C a R_B mně slouží tyto vztahy:

$$R_C = \frac{U_{2max} - U_{CE}}{I_C}; \quad (2.3)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21e}}; \quad (2.4)$$

$$R_B = \frac{U_{1max} - U_{BE}}{I_B}. \quad (2.5)$$

Tyto vztahy vycházejí z obvodového řešení podle schématu zapojení na obr. 6.2. Budu předpokládat, že dané voltmetry mají nekonečně velký vnitřní odpor a nebudou tak ovlivňovat daný obvod. Reálně ale tyto voltmetry mají vnitřní odpor řádově od stovek kΩ až po stovky MΩ. Nyní můžu přistoupit k samotnému výpočtu. Hodnotu rezistoru R_C vypočítám podle vztahu (2.3) a dosadím zde hodnoty, které jsem si stanovil:

$$R_C = \frac{U_{2max} - U_{CE}}{I_{Cmax}} = \frac{13 - 4}{30m} = \mathbf{300\ \Omega}.$$

Pro výpočet R_B je nejdříve nutné vypočítat hodnotu proudu I_B podle vztahu (2.4), do kterého dosadím potřebné hodnoty:

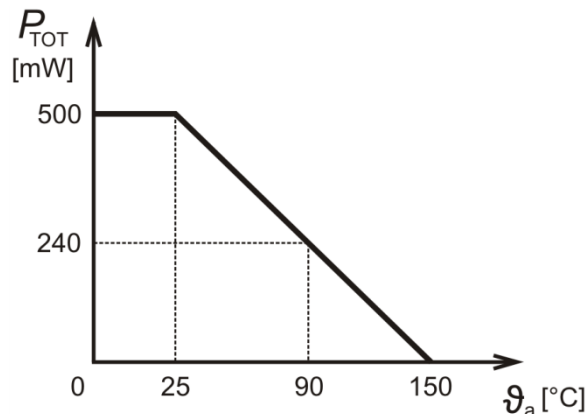
$$I_B = \frac{I_C}{h_{21e}} = \frac{30m}{270} = \mathbf{111,11\ \mu A}.$$

A nakonec vypočítáme samotnou hodnotu rezistoru R_B podle vztahu (2.5), do kterého dosadím mnou zvolené hodnoty:

$$R_B = \frac{U_{1max} - U_{BE}}{I_B} = \frac{2 - 0,604}{111,11\mu} = \mathbf{12,564\ k\Omega}.$$

Toto jsou vypočítané teoretické hodnoty rezistorů, ale v reálném měřicím přípravku jsou umístěny rezistory s hodnotami $R_C = 345,4\ \Omega$ a $R_B = 15,21\ k\Omega$.

Dále je nutné při měření zajistit, aby při celém měření nebyla překročena hodnota mezní dovolené kolektorové ztráty. Tato hodnota říká, kolik ztrátového tepla tranzistor vyzáří při svém provozu. Toto je katalogová hodnota a pro mnou měřený tranzistor je $P_{TOT} = 500\ mW$ (pro teplotu okolí ϑ_a rovnu nebo menší než $25\ ^\circ C$). Tato hodnota se musí snižovat se zvyšující se teplotou okolí tranzistoru, v mém případě teplotou termostatu. Jinak dochází ke zničení dané polovodičové součástky. Tato hodnota se snižuje lineárně s rostoucí teplotou až do hodnoty $P_{TOT} = 0\ W$, kdy je teplota rovna maximální teplotě polovodičového přechodu tranzistoru, v případě mnou měřeného tranzistoru je $\vartheta_{max} = 150\ ^\circ C$. Tento průběh je zobrazen v grafu na obr. 2.6 [3].



Obr. 2.6 Graf změny celkového vyzářeného výkonu na teplotě okolí tranzistoru BC549B.

Z tohoto grafu, pak určíme funkci, která charakterizuje tento průběh, protože bude měření probíhat pro teploty 25 až 90 °C, bude výsledná funkce funkcí přímky, která prochází vyznačenými body v rozmezí 25 až 150 °C. Odvození není složité a vyšla mi rovnice (2.6), která přesně charakterizuje tento průběh. Tato rovnice bude použita při samotném měření a jejím úkolem bude zajišťovat, aby hodnota P_{TOT} pro danou teplotu nebyla překročena. Protože

však budu měřit pouze napětí a proudy na tranzistoru je nutný přepočet těchto proudů a napětí přímo na celkový ztrátový výkon, což se vypočítá podle vztahu (2.7):

$$P_{TOT} = (-\vartheta_a + 150) \cdot 4; \quad (2.6)$$

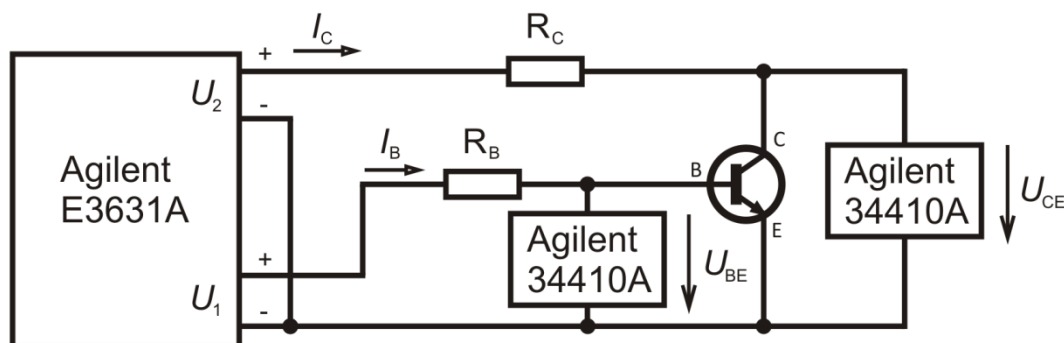
$$P_{TOT} = I_C \cdot U_{CE}. \quad (2.7)$$

Během celého měření musí proto platit tato nerovnice (2.8):

$$(-\vartheta_a + 150) \cdot 4 \geq I_C \cdot U_{CE}. \quad (2.8)$$

Měřicí přístroje, které budou tento tranzistor měřit, jsou již předem dány. Jako regulovatelný zdroj napětí bude sloužit model E3631A od firmy Agilent Technologies. Toto zařízení obsahuje tři nezávislé zdroje. Využiji pouze dva. A to zdroj, který může dodávat napětí až 6 V při maximálním proudu 5 A. Tento zdroj bude sloužit k regulaci napětí U_{BE} . Druhý zdroj, který může dodávat napětí až 25 V při maximálním proudu 1 A, bude sloužit k regulaci U_{CE} . Tento přístroj také umí měřit sám na sobě výstupní napětí a proud, proto bude sloužit i jako ampérmetr, který bude měřit proudy I_C a I_B .

Jako měřicí přístroje budou sloužit dvojice přístrojů 34410A také od firmy Agilent Technologies. Tyto přístroje jsou multifunkční a umí měřit různé veličiny. Ve své práci budu využívat pouze měření stejnosměrného napětí. Na obr. 2.7 je vidět schematické zapojení měřicích přístrojů a měřeného tranzistoru.



Obr. 2.7 Schéma zapojení měřicích přístrojů.

2.2.1 Popis samotného měření

Samotné měření bude probíhat tak, že budeme měřit současně jak výstupní voltampérovou charakteristiku, tak i závislost parametru h_{21e} na I_C . Měření výstupní charakteristiky bude probíhat pro několik konstantních hodnot I_B . Hodnoty I_B jsou 9,6 μA , 26 μA , 42,5 μA , 59 μA a 92 μA , což jsou hodnoty proudů, které odpovídají nastavení napětí U_1 v rozmezí 0,75 až 2 V s krokem 0,25 V. Protože při měření h_{21e} je nutné zajistit konstantní napětí U_{CE} , je vše vyřešeno tak, že u měření výstupní charakteristiky se při dosažení hodnoty $U_{CE} = 4$ V změřím hodnoty I_B a I_C pro tuto charakteristiku. Měřit budu tak, že nastavím napětí U_1 na hodnotu, která se nebude během celého měření měnit. Poté budu zvyšovat napětí U_2 a odečítat proudy I_B a I_C . Tím změřím jednu závislost I_C na U_{CE} pro jednu hodnotu I_B . Také získám jeden bod pro závislost h_{21e} na I_C . Toto měření budu opakovat pro všechny výše uvedené hodnoty I_B , až získám kompletní výstupní charakteristiku a závislost h_{21e} na I_C . Celé měření budu opakovat pro několik teplot okolí tranzistoru. Jsou to teploty 25, 35, 50, 60, 75 a

90 °C. Také budu během celého měření kontrolovat, zda není překročena hodnota P_{TOT} , aby nedošlo ke zničení měřeného tranzistoru.

Výsledky měření budou umístěny v grafech, což je přehlednější a na první pohled jsou patrné závěry celého měření.

Tímto postupem získám soubor výstupních charakteristik pro různé teploty a také soubor závislostí h_{21e} na I_C pro různé teploty. Z těchto souborů pak půjde velmi snadno vyvodit vlivy teploty na měřený tranzistor a také obecně na polovodičové součástky.

3 Termostat

3.1 Princip termostatu

Termostat je zařízení, které je určeno pro nastavování požadované teploty a její udržení na stále stejné hodnotě v určeném prostoru. V principu se jedná o velmi jednoduché zařízení, které je složeno z několika částí. První část tvoří zařízení, které zajišťuje zvyšování teploty, dále pak zařízení, které má na starosti snižování teploty a nakonec nějaké regulační zařízení, které řídí první dvě zařízení, aby se dosáhlo požadované teploty a jejího udržení.

Zařízení, které má na starosti ohřev, je vlastně jakékoliv topné zařízení. Může to být prakticky jakýkoli zdroj tepla. Různé elektrické přímotopy, kotle na různá paliva nebo také obyčejné výkonové tranzistory, jejichž vyzářené teplo může ohřívat potřebnou část mého zařízení. Podle potřebného dodaného tepla si daný zdroj vybíráme.

Naopak zařízení, které má na starosti ochlazování, musí přebytečné teplo odvádět z našeho tepelně regulovaného prostoru. Typicky různé ventilátory, chladiče, chladicí kapaliny a další. Opět podle potřeby kolik tepla musíme z daného prostoru odvést, takový druh chlazení volíme. Pro minimální potřeby stačí i vypnutí ohřívacího zařízení a nechat daný prostor ochladit samovolně. Ale protože se u termostatů používá kolem regulovaného prostoru tepelná izolace, která má za úkol zajistit velkou tepelnou setrvačnost, je toto samovolné ochlazování náročné na čas.

Zařízení, které má na starosti regulaci teploty, bývá většinou nejsložitější zařízení z celého termostatu. K jednoduché regulaci stačí i bimetalový pásek, který je schopný zapínat a vypínat topné zařízení, což je velmi používané při vytápění třeba rodinných domů. Pokud ale potřebujeme zajistit přesné nastavení teploty a její stálé udržení, potřebujeme složitější zařízení. Například použití mikrokontroléru, který bude mít na vstupu informace o aktuální teplotě a na výstupu připojené zařízení, sloužící ke změnám teplot. Daný mikrokontrolér je naprogramován tak, aby aktuální teplotu vyhodnocoval a podle zadané stálé teploty spouštěl, případně vypínal zařízení, která aktuální teplotu změni na teplotu požadovanou.

3.2 Návrh termostatu

Pro tento semestrální projekt je nutné zvolit vhodný termostat, který bude přesně odpovídat požadovaným vlastnostem. Proto si nejprve určíme, jaké vlastnosti by měl daný termostat mít.

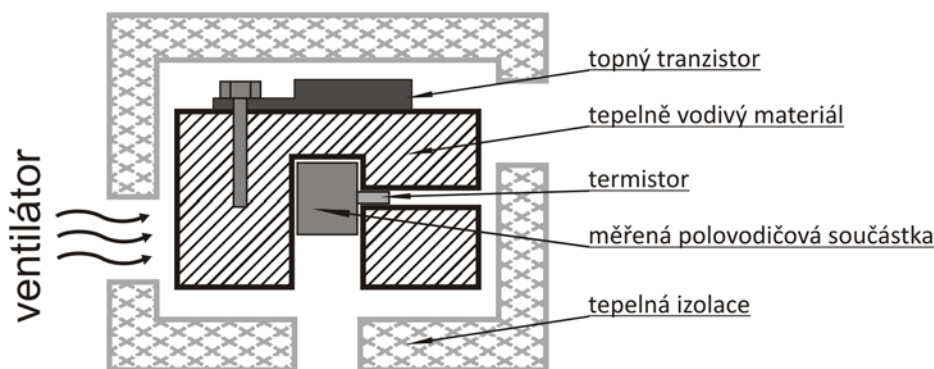
Nejdůležitější vlastnost je teplotní rozsah, ve kterém bude termostat pracovat. Pro měření závislosti teploty na vlastnostech polovodičových součástek, se jako nejlepší jeví teplotní rozsah od pokojové teploty až po maximální dovolenou teplotu, při které lze danou součástku provozovat. Proto zvolím teplotní rozsah od 25 °C do 90 °C.

Tyto teploty se budou muset dosáhnout pomocí topného zařízení. Vzhledem k tomu, že celkové rozměry celého termostatu nebudou příliš velké, z důvodu malé velikosti měřených tranzistorů, nebudou ani nároky na výkon potřebný k ohřátí celého termostatu velké. K tomuto účelu postačí výkonový tranzistor s udávanou hodnotou vyzářovaného ztrátového výkonu v desítkách wattů. Vybral jsem tranzistor BD243B, který má udávaný ztrátový výkon 65 W, jeho maximální napětí U_{CE} je 80 V a maximální proud I_C je 6 A. Tento tranzistor je umístěn v pouzdře TO220.

Další vlastností každého termostatu, je schopnost určit jakou aktuální teplotu má daný regulovaný prostor. K těmto účelům slouží buď přímo teploměry, nebo termistory, u kterých se ale musí jejich vnitřní odpor přepočítávat na teplotu. Pro svou práci jsem vybral termistor NTC640-4K7, který má při teplotě 25 °C odpor 4,7 kΩ. Při zvyšování teploty termistoru tento odpor klesá. Přesnost tohoto termistoru je $\pm 0,75\%$.

Jako prvek na snižování teploty bude sloužit malý ventilátor o rozměrech 40x40 mm, který je napájen 12 V stejnosměrného napětí. Vybral jsem model KD1204PFS2.

Regulace a řízení termostatu bude vykonávat mikrokontrolér. Jeho popis a návrh je uveden v kapitole 4. Jak vypadá principiálně celý termostat, je zobrazeno na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Nákres termostatu.

Na tomto nákresu je zachyceno v řezu, jak budou rozmístěny jednotlivé části termostatu.

Tepelně vodivý materiál musí být takový, aby dobře vedl teplo, jako nejvhodnější se zdají být měď a hliník. Zvolil jsem hliník, protože je lehký a dobře opracovatelný. Jako materiál pro tepelnou izolaci jsem zvolil polystyren, který bude z vnější strany obalen hliníkovou fólií.

3.3 Realizace termostatu

Celý termostat je sestaven podle návrhu z kap. 3.2. Jádro je tvořeno z hliníkového bloku o rozměrech 35 x 25 x 10 mm, ve kterém jsou umístěny otvory pro umístění měřeného tranzistoru a termistoru a také otvor se závitem pro upevnění topného tranzistoru. Hliníkové jádro je umístěno v polystyrenovém kvádru o rozměrech 60 x 55 x 60 mm. Polystyrenový kvádr je upraven tak, aby kolem hliníkového jádra bylo dostatek volného prostoru pro proudění vzduchu. Dále jsou v tomto kvádru umístěny dva otvory, jeden slouží jako sací otvor a je u něho umístěn ventilátor a druhý otvor umístěný na protilehlé straně slouží jako výfukový otvor. Tento systém slouží pro ochlazování termostatu. Celý polystyrenový blok je obalen hliníkovou fólií.

Protože termostat bude připojen k bloku Řízení, regulace a komunikace s PC pomocí D/A převodníků je nutné navrhnout obvod, který bude regulovat topný tranzistor a ventilátor právě pomocí napětí na výstupu D/A převodníku. Tento obvod je taky nutný kvůli tomu, že D/A převodníky nejsou schopny dodat takové napětí a proud, které jak topný tranzistor, tak ventilátor, potřebují pro svou činnost. Schéma zapojení tohoto obvodu je součástí přílohy 2.

Celý termostat tak jak jsem ho navrhl je schopen dosahovat a udržovat teploty zcela bez problémů v rozmezí 25 až 90 °C, určitě by byl schopen pracovat při teplotách až 100 °C, ale to by již byla maximální konstrukční teplota. Dosažení teplot nižších než 25 °C je obtížné, protože spodní hranice je omezena teplotou okolí, ve kterém je termostat umístěn. Určitě by byl schopen pracovat i při teplotách blízkých bodu mrazu, protože však je termostat určen pro měření v laboratoři, je jeho spodní teplotní hranice omezena na pokojovou teplotu laboratoře, což je ve většině případů v rozmezí 20 až 25°C. Další z parametrů je přesnost teploty a její udržení na konstantní teplotě. Ta závisí na přesnosti termistoru, na způsobu regulace a také na tom jak moc ovlivňuje měřený tranzistor teplotu v termistoru. Reálné měření ukázalo, že teplota kolísala v rozmezí $\pm 1,5$ °C během celého měření oproti požadované teplotě. Další neméně důležitý parametr je rychlost, se kterou je termostat schopen měnit svou teplotu. Reálné měření ukázalo, že z teploty 25 °C se termostat ohřeje na teplotu 90 °C za 8 min a 24,2 vteřiny, což je čas 7,757 s, za který se termostat ohřeje o 1 °C. Ochlazování probíhá rychleji. Z teploty 90 °C na teplotu 25 °C se termostat ochladí za 5min a 35,2 s, což je čas 5,157 s, za který se termostat ochladí o 1 °C. Tyto rychlosti jsou zprůměrované, protože při ohřívání i chlazení jsou při nízkých teplotách tyto rychlosti nižší než při teplotách blízkých 90 °C, kdy jsou rychlosti ohřívání i chlazení vyšší.

4 Řízení, regulace a komunikace s PC

Tato část je v celém laboratorním pracovišti nejsložitějším zařízením. Bude se skládat z řídicího mikrokontroléru a rozhraní zajišťujícího komunikaci s PC: mikrokontrolér bude mít na starosti udržovat konstantní teplotu v termostatu na hodnotě, která se bude zadávat z ovládacího prostředí VEE od společnosti Agilent, spuštěného na PC, který bude s mikrokontrolérem spojený, jak je uvedeno v zadání této bakalářské práce, pomocí rozhraní USB. Dále pak bude mikrokontrolér posílat informaci o aktuální teplotě na termostatu zpět do VEE.

4.1 Rozhraní USB

Rozhraní USB (Universal Serial Bus) je moderní rozhraní, které se používá pro datové spojení mezi osobním počítačem a zařízením. Jeho univerzálnost spočívá v tom, že je možné přes identické rozhraní připojovat různé zařízení jako klávesnice, myši, externí pevné disky, fotoaparáty a různá další zařízení. Toto rozhraní podporuje technologii Plug & Play, která zajišťuje okamžité připojení a použití daného zařízení k PC bez nutnosti resetování PC. Většinou ale musíme před prvním použitím nainstalovat do PC příslušné ovladače k danému zařízení, někdy je ale tento problém vyřešen automatickou instalací ovladačů přímo operačním systémem. Připojení probíhá tak, že nejprve po připojení zařízení hub pozná podle zdvižené datové linky, že je připojeno zařízení, poté se postupuje podle následujících několika kroků [3].

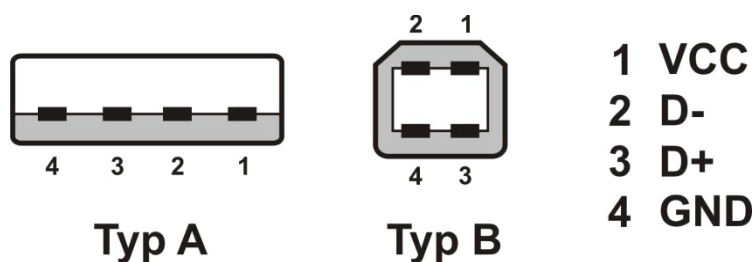
1. Hub informuje hostitelský počítač (host) o tom, že bylo připojeno nové zařízení.
2. Hostitelský počítač se dotáže hubu, na který port bylo zařízení připojeno.
3. Hostitelský počítač nyní ví, na který port bylo zařízení připojeno. Vydá příkaz tento port zapnout a provést vynulování (reset) sběrnice.
4. Hub vyrobí nulovací signál (reset) o délce 10 ms. Uvolní pro zařízení napájecí proud 100 mA. Zařízení je nyní připraveno a odpovídá na implicitní (default) adresu.
5. Než zařízení USB obdrží svou vlastní adresu sběrnice, je možno se na ně obracet přes implicitní adresu 0. Hostitel si přečte první bajty deskriptoru zařízení, aby stanovil, jakou délku mohou mít datové pakety.
6. Hostitel přiřadí zařízení jeho adresu na sběrnici.
7. Hostitel si ze zařízení pod novou sběrniceovou adresou načte všechny konfigurační informace.
8. Hostitel přiřadí zařízení jednu z možných konfigurací. Zařízení nyní může odebírat tolik proudu, kolik je uvedeno v jeho deskriptoru zařízení. Tím je připraveno k použití. Hostitel přiřadí zařízení jeho adresu na sběrnici.

Každý hostitelský počítač umožňuje připojit současně až 127 zařízení. USB rozhraní je typu Master, což znamená, že všechno je řízeno z hostitelského počítače a všechny aktivity vycházejí z něho. To znamená, že PC může požadovat data od zařízení, ale samotné zařízení nemůže vysílat data samo od sebe, musí přijít požadavek od PC pro vyslání dat. Celé datové spojení je prováděno pouze přes dva vodiče označované jako D+ a D-. Další dva vodiče jsou označované jako GND (signálová zem) a VCC (+5 V). Samotný princip komunikace přes rozhraní USB je velmi složitý a pro moje použití postačí využít již naprogramovaných aplikací pro mikrokontroléry, které jsou zdarma ke stažení ze specializovaných serverů

zabývajících se touto problematikou a jsou k nim připojeny zdrojové kódy, které nepodléhají autorským právům. Tyto aplikace jsou naprogramované tak, že se uživatel již nemusí starat o samotnou komunikaci rozhraní USB a pouze již pracuje s funkcemi, které zajišťují posílání a přijímání užitečných dat. Tyto funkce jsou napsány v programovacím jazyku C.

Přes rozhraní USB lze připojené rozhraní i napájet. Jedná se o 5 V stejnosměrného napětí a maximální proud je podle specifikace 100 mA. Lze ale celkem bez potíží zatížit USB rozhraní proudem až 500 mA. Což by mělo stačit k napájení celého mikrokontroléru.

Ve své práci využiji spojení mezi PC a mikrokontrolérem pomocí 2 m dlouhého kabelu, který má na jednom konci konektor typu A, a na druhém konci konektor typu B, ten bude připojen do mikrokontroléru. Jednotlivé konektory jsou zobrazeny na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Konektory rozhraní USB.

4.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je z definice jednočipový počítač, to znamená, že obsahuje mikroprocesor s pamětí RAM, dále pak paměti typu ROM, EEPROM a FLASH, logické vstupy/výstupy, komunikační linky, různé časovače, modulátory, čítače nebo A/D převodníky. To celé je uzavřeno v jednom pouzdře. Většina mikrokontrolérů využívá Harvardskou architekturu, to znamená, že má samostatnou paměť pro data (RAM ve velikosti jednotek B až po desítky kB) a samostatnou paměť pro program (ROM, EEPROM nebo FLASH o velikosti desítek až stovek kB). Mikrokontroléry se vyznačují malými nároky na napájení, přitom díky svým funkcím a periferiím jsou prakticky univerzálními řídicími zařízeními.

4.2.1 Návrh mikrokontroléru

Pro potřebu mnou navrhovaného laboratorního pracoviště je nutné vybrat vhodný mikrokontrolér, který by nebyl obtížný na naprogramování, nenáročný na napájení z důvodu přímého napájení přes USB rozhraní a měl v sobě integrovaný řadič USB.

Po prozkoumání trhu s produkty výrobců mikrokontrolérů, jsem vybral jako hlavní dva kandidáty model PIC18F4550 od společnosti Microchip Technology a model AT90USB1287 od společnosti Atmel Corporation.

Nakonec jsem zvolil model AT90USB1287 z hlavního důvodu, že společnost Microchip Technology neposkytuje nástroje na vývoj a programování zdarma a pokud ano, jsou nějakým způsobem znevýhodněné, buď max. velikostí zkompilevaného programu, nebo počtem dní, po které lze dané vývojové prostředí používat. Zatímco společnost Atmel Corporation poskytuje své vývojové prostředí AVR Studio 4 zdarma bez jakýchkoliv omezení. Stejně jako Microchip Technology také poskytuje ukázky kódu, jak pracovat s rozhraním USB. Rozhodující je hlavně fakt, že jsem s produktem od společnosti Atmel

pracoval ve výuce mikroprocesorové techniky na vysoké škole, kde jsme programovali mikroprocesor ATmega16.

AT90USB1287 je 8bitový mikrokontrolér, který je založen na rozšířené RISC architektuře. Obsahuje 138 instrukcí, třicet dva 8bitových registrů a jeho rychlost je 16 milionů instrukcí za vteřinu při frekvenci, kterou udává připojený krystal, 16 MHz. Dále obsahuje paměť typu FLASH, která má velikost 128 kB a počet přepsání je 100 000. Podporuje rozhraní USB ve verzi 1.1 a dokonce také ve verzi 2.0 s přenosovou rychlostí až 12 Mbit/s, což je pro moje použití dostačující. Dále tento mikrokontrolér obsahuje spoustu periférií, které dělají z tohoto zařízení velmi univerzální mikrokontrolér. Obsahuje například dvojici 8bitových časovačů/čítačů, dvojici 16bitových časovačů/čítačů, osmi kanálový 10bitový A/D převodník, programovatelný sériový USART, analogový komparátor, čtyři 8bitové kanály pro pulsně šířkovou modulaci, šestici programovatelných 8bitových I/O linek a spoustu dalších. Vše je samozřejmě umístěno v jednom pouzdře a to TQFP se šedesáti čtyřmi vývody. Programování probíhá tak, že pomocí USB kabelu ho připojíme k PC a pomocí aplikace FLIP od společnosti Atmel Corporation, který je zdarma ke stažení, nahrajeme zkompilovaný firmware do mikrokontroléru. Kompilace probíhá ve vývojovém prostředí AVR Studio 4, ve kterém se napíše potřebný program v jazyce C. Za pomoci takzvaného bootladeru, který je uložen v paměti již od výroby, se zajistí snadná komunikace mikrokontroléru s PC přes rozhraní USB.

Pro řízení mikrokontroléru s termostatem budou sloužit dvě periferie. A to A/D převodník, který bude připojen k termistoru a bude zjišťovat aktuální teplotu. Dále pak se bude jednat o dvojici 8bitových portů, která bude sloužit jako vstup pro dvojici D/A převodníků, ze kterých se bude ovládat topný tranzistor a ventilátor.

4.3 D/A převodník

D/A převodník slouží k převádění digitálního signálu na analogový. Protože ve své práci budu potřebovat pouze paralelní převodník D/A, budu popisovat princip činnosti pouze takového druhu převodníku.

Na vstupu převodníku je digitální slovo, o určitém počtu n bitů. Většinou se používají napěťové úrovně TTL pro vstupní digitální signál. Toto slovo je převedeno na analogové stejnosměrné napětí, které nabývá 2^n hodnot s určitým krokem. D/A převodníky jsou konstruované tak, že výstup nemůže být moc proudově zatížen a proto se na výstup převodníků dávají proudově nenáročné obvody nebo obvody s externím napájením.

4.3.1 Návrh D/A převodníku

Pro svou práci budu potřebovat takový paralelní převodník, který bude napájen napětím do 5 V, což je napětí, které dodává rozhraní USB, dále musí být 8bitový, protože mikrokontrolér AT90USB1287 má 8bitové výstupní porty.

Po prozkoumání trhu jsem našel pouze jediný D/A převodník, který splňuje mé požadavky, je to model AD557JN od společnosti Analog Devices. Převodník je napájen napětím 5V, je 8bitový, výstupní napětí nabývá hodnot 0 až 2,55 V a je schopen dodávat na výstupu proud maximálně 5 mA. Celý převodník je umístěn v pouzdře DIL16. Převodník umožňuje několik režimů, kdy spíná výstupní napětí podle řídicích signálů. Ve své práci použiji režim, kdy převodník mění digitální signál na analogový v reálném čase, to znamená, že oba piny pro řídicí signály jsou uzemněny.

4.4 Realizace Řízení, regulace a komunikace s PC

Celý tento blok je zrealizován tak, že všechny jeho části jsou umístěny na jedné desce plošných spojů neboli DPS.

Na této desce je umístěn mikrokontrolér se všemi svými potřebnými součástkami pro svou bezproblémovou funkci, dále jsou zde umístěny dva D/A převodníky, které řídí obvod, který napájí topný tranzistor a ventilátor. Tento obvod je pak přímo spojen s termostatem, respektive s topným tranzistorem a ventilátorem. Dále je na desce umístěn obvod zajišťující správnou funkci termistoru. Celé schéma zapojení je uvedeno v příloze 2.

4.4.1 Realizace mikrokontroléru

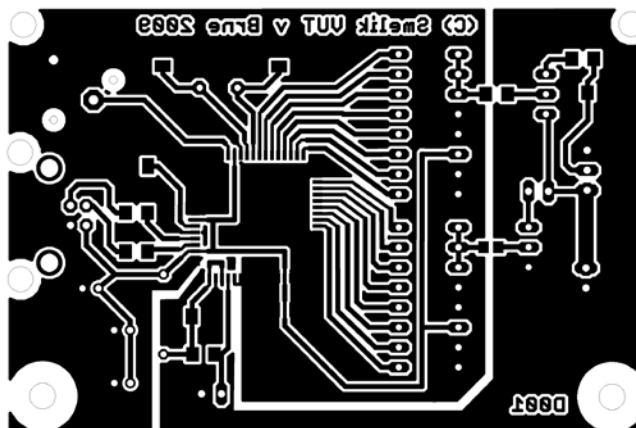
Připojení všech periférií mikrokontroléru je realizováno dle doporučení výrobce, které uvádí v dokumentaci k AT90USB1287 [4]. Všechny potřebné součástky, které mikrokontrolér potřebuje pro svou činnost, jsou uvedeny ve schématu zapojení v příloze 2.

Dalším krokem bylo daný mikrokontrolér naprogramovat. K tomuto účelu jsem použil software, který společnost Atmel Corporation poskytuje zdarma. Je to AVR Studio ve verzi 4.16 [5]. Dále jsem využil software AVR-GCC [6], což je nadstavba pro AVR Studio a umožňuje psát zdrojový kód v jazyce C místo jazyku symbolických instrukcí, který je primárně určen pro programování mikrokontrolérů. V tomto programu budu také výsledný zdrojový kód kompilovat do výsledného firmware, který se nahrává do mikrokontroléru pomocí programu FLIP [7]. Bohužel se během programování rozhraní USB, které mělo sloužit pro posílání požadované a aktuální teploty mezi počítačem a mikrokontrolérem ukázalo, že daná problematika je velmi složitá a nebyl jsem schopen naprogramovat mikrokontrolér tak, aby využíval rozhraní USB pro komunikaci s PC, bohužel je to jeden z požadavků zadání této bakalářské práce. Problém jsem vyřešil tak, že jsem napsal kód, ve kterém je přímo zadaná požadovaná teplota, kterou má termostat udržovat po celou dobu měření. Pro každou teplotu, pro kterou se bude měřit tranzistor je napsán a zkompilován samostatný program, který se během měření bude nahrávat do mikrokontroléru. Tím se trochu celé měření zkomplikuje, ale na výsledky měření to nebude mít vliv. Ukázka zdrojového kódu pro teplotu 90 °C je uvedena v příloze 1.

Program pracuje tak, že na začátku si nastaví vše potřebné, čili inicializuje všechny periferie (A/D převodník, I/O Port C a Port D), nastaví požadovanou teplotu a poté se spustí nekonečná smyčka, které mikrokontrolér pracuje po celou dobu. Nejdříve přečte hodnotu z A/D, kterou přepočítá na aktuální teplotu v termostatu a poté dojde k porovnání s požadovanou teplotou. Pokud je aktuální teplota menší než požadovaná, mikrokontrolér zapne topný tranzistor a vypne ventilátor. Pokud je tomu obráceně, mikrokontrolér vypne topný tranzistor a zapne ventilátor. Takto je zajištěn požadavek, aby byla v termostatu konstantní teplota.

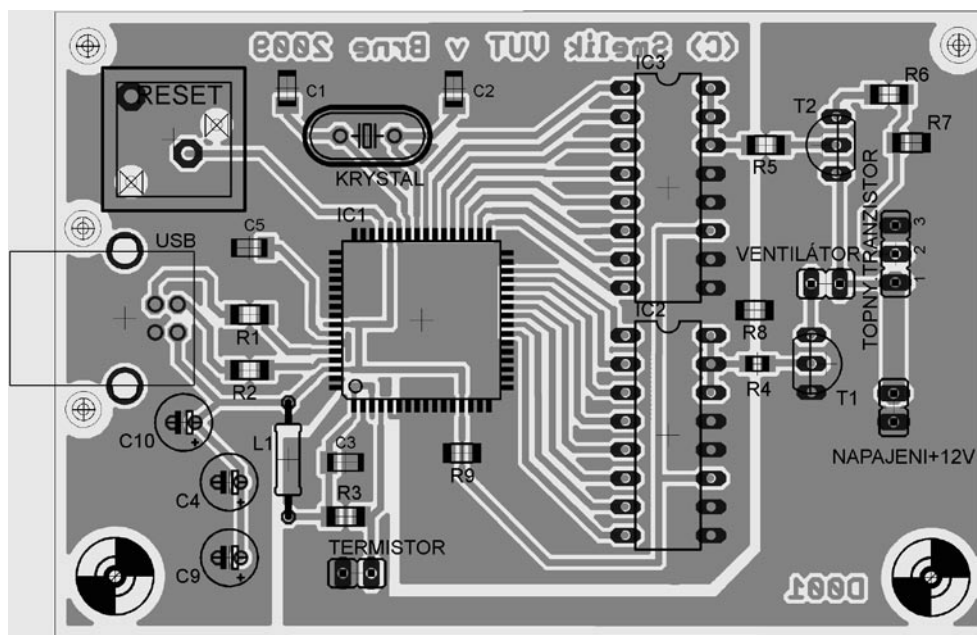
4.4.2 Návrh a realizace desky plošných spojů

Desku jsem navrhoval v programu EAGLE ve verzi 4.16. Nejdříve jsem sestavil dle mých návrhů schéma zapojení viz příloha 2. Poté jsem navrhl desku plošných spojů, dle schématu zapojení a také podle požadavků na jednotlivé součástky umístěné na desce. Desku jsem nechal vyrobít ve školní dílně. Na obr. 4.2 je vidět návrh desky plošných spojů určený na výrobu, který byl vygenerován pomocí návrhového systému EAGLE.



Obr. 4.2 Návrh DPS určený na výrobu.

Dále je nutné při realizaci desky vědět, kde a jak danou součástku umístit, k tomu slouží výkres rozmístění součástek, ten je zobrazen na obrázku 4.3. Tento výkres byl vygenerován pomocí návrhového systému EAGLE.



Obr. 4.3 Rozmístění součástek.

Ještě pro úplnost zde doplním seznam součástek, které se nacházejí na DPS. Tento seznam byl vygenerován pomocí návrhového systému EAGLE a je uveden v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Seznam součástek.

| <i>Součástka</i> | <i>Hodnota</i> | <i>Pouzdro</i> |
|------------------|----------------|----------------|
| C1 | 18pF | C1206K |
| C2 | 18pF | C1206K |
| C3 | 100nF | C1206K |
| C4 | 10uF | E2-5 |
| C5 | 1uF | C1206K |
| C9 | 0.1uF | E2-5 |
| C10 | 0.1uF | E2-5 |
| IC1 | AT90USB1287-AU | TQFP64 |
| IC2 | | DIL16 |
| IC3 | | DIL16 |
| KRYSTAL | 16MHz | HC49U70 |
| L1 | 10uH | 0207/10 |
| NAPAJENI+12V | | JP1 |
| R1 | 22R | R1206 |
| R2 | 22R | R1206 |
| R3 | 1K | R1206 |
| R4 | 820R | R0805 |
| R5 | 4K7 | R1206 |
| R6 | 120R | R1206 |
| R7 | 1K3 | R1206 |
| R8 | 0R | R1206 |
| R9 | 0R | R1206 |
| RESET | P-B1715 | P-B1715 |
| T1 | BC547C | TO92-EBC |
| T2 | BC546B | TO92-EBC |
| TERMISTOR | | JP1 |
| TOPNY.TRANZISTOR | | JP2 |
| USB | USB-B Female | 85-32004-10X |
| VENTILÁTOR | | JP1 |

5 Osobní počítač

5.1 Návrh použití PC

Osobní počítač bude sloužit k samotnému řízení a vyhodnocování měření závislosti polovodičových součástek na teplotě. Na počítači poběží ovládací prostředí Agilent VEE, ve kterém bude vytvořen řídicí program. Tento program bude mít na starosti samotné měření, kdy bude řídit všechny měřicí přístroje a taky získávat změřené hodnoty. Tyto hodnoty budou zakreslovány do grafů pro větší přehlednost. Dále bude tento program zasílat požadovanou teplotu do mikrokontroléru a také bude zobrazovat uživateli aktuální teplotu v termistoru. Podle zadání musí být zcela zautomatizované, kdy uživatel pouze celé měření zapne a celé měření pak zajistí tento program, kdy na konci měření získá uživatel výsledek měření v podobě grafů.

5.1.1 Agilent VEE

Ovládací prostředí VEE je vytvořeno společností Agilent. Má sloužit jako velmi jednoduchý nástroj pro řízení a zpracovávání výsledků různých měření a vědeckých pokusů. Je navržen tak, aby uživatel nemusel znát žádné programovací jazyky ani žádné znalosti o rozhraních a protokolech, které VEE využívá při komunikaci s měřicími a jinými přístroji. Program, který uživatel pro svou potřebu tvoří, je sestavován z jednotlivých bloků, které pouze propojí podle toho, jak se dané bloky mají v čase vykonat. Jednotlivé bloky lze rozdělit do několika kategorií. Jedna kategorie bloků představuje samotné měřicí přístroje, kdy uživatel do těchto bloků zadává pouze příkazy, které má daný měřicí přístroj vykonat. Jsou velmi jednoduché a snáze pochopitelné. Další kategorie jsou bloky představující matematické operace, kdy můžeme prakticky využívat nejrůznější matematické operace a výpočty. Poslední skupinou bloků jsou bloky, které provádí různé řídicí a logické operace, jako bloky typu *If/then/else*, *For range* a *Repeat until*. VEE obsahuje spoustu dalších bloků, funkcí a dalších ovládacích prvků, je to opravdu univerzální nástroj pro automatické měření, pouze jsem nastínil jeho možnosti. Toto prostředí je velmi vhodné pro začátečníky i pro pokročilé uživatele, protože pro pokročilé uživatele VEE nabízí spoustu rozšířených nastavení, možností ovládání atd., přitom ale umí používat jednoduché nastavení a ovládání pro začínající uživatele.

Připojování měřicích přístrojů se provádí přes různá rozhraní, nejpoužívanější je USB a GPIB. V poslední době se taky začíná prosazovat připojení přes LAN, kdy jde dané měření možné ovládat ze vzdáleného počítače připojeného do sítě.

Další výhodou tohoto prostředí je, že vytvořený program je uložen pouze v jednom souboru, což umožňuje snadný přenos tohoto souboru mezi počítači. Tento soubor má příponu *vee*.

5.2 Realizace programu ve VEE

Mnou navržený program podle požadavků z kap. 2.2.1 a kap. 4.4 je velmi jednoduchý k ovládání, kdy stačí pouze nastavit teplotu, pro kterou se bude měření provádět a spustit měření tlačítkem *Start*. Po skončení měření máme k dispozici dva grafy a to graf výstupní voltampérové charakteristiky a graf závislosti parametru h_{21e} na I_C .

5.2.1 Popis programu ve VEE

Celý program byl vytvořen v prostředí Agilent VEE ve verzi 8.0, které jsem měl k dispozici. Program nese jméno „Mereni.vee“. Po spuštění programu tlačítkem *Start* se program dostane do smyčky *For range*, ve které nastavuje hodnotu od 0,75 do 2 po kroku 0,25. Tyto hodnoty představují napětí U_1 . Pro každou hodnotu se pak provádí měření jedné výstupní charakteristiky. To se provádí tak, že se nejprve pošle příkaz do zdroje, aby se nastavilo napětí U_1 , které bude po celou dobu měření jedné charakteristiky konstantní. Dále se program dostane do další smyčky *For range*, ve které nastavuje hodnoty od 0 po 50 s krokem 1. Tyto hodnoty představují počet měření pro každou charakteristiku. Počet 50 je podle mě dostatečný počet pro velmi přesné měření. Dále se z této hodnoty také vypočítá hodnota napětí U_2 , která se pak nastaví na druhém zdroji. Po takto nastavených napětích U_1 a U_2 přejdeme k měření proudů I_B a I_C a taky napětí U_{CE} . Pro měření závislosti h_{21e} na I_C , kde potřebujeme hodnoty pro konstantní hodnotu U_{CE} , ještě kontroluje, zda změřené napětí U_{CE} není v rozmezí hodnot 3,85 až 4,1 V (toto rozmezí je dáno tím, že zdroj nastavuje napětí skokově po krocích a nejde proto zaručit, že napětí U_{CE} bude přesně 4 V, proto jsem zavedl tento rozptyl, kdy je zaručené, že právě jednou zdroj napětí v tomto rozsahu nastaví). Pokud ano je povoleno, aby právě změřené hodnoty byly zakresleny do této závislosti, kdy se ještě vypočítá hodnota h_{21e} , kterou potřebujeme do tohoto grafu. Pokud ne, nejsou zakresleny a pokračuje se v měření. Ještě než se pokračuje v měření, jsou změřené hodnoty vyneseny do grafu výstupní voltampérové charakteristiky. Toto se opakuje, dokud není vykreslena celá charakteristika pro různé hodnoty I_B a také pokud není vykreslena celá závislost h_{21e} na I_C . Během celého měření se ještě pro zadanou teplotu okolí měřeného tranzistoru kontroluje, zda není překročena hodnota P_{TOT} , pokud ano je měření pro danou charakteristiku ukončeno a pokračuje se měřením další charakteristiky od začátku. Až je celé měření ukončené a jsou vykresleny kompletně oba grafy je měření ukončeno tak, že je zdrojům nastaveno nulové napětí a jsou odpojeny výstupní svorky. Jak vypadá celý program sestavený ve VEE je uvedeno v příloze č. 3.

5.2.2 Seznam příkazů pro ovládání měřicích přístrojů ve VEE a jejich použití

Zde jsou uvedeny příkazy, které jsem použil při sestavování programu pro měření. Měřicí přístroje, které jsem používal, ale zvládnou mnohem více příkazů, než je zde uvedeno.

Příkazy pouze pro zdroj Agilent E3631A:

| | |
|----------------------|---|
| INST:SEL P6V | nastaví napájecí zdroj pro zadávání parametrů a měření na hladině zdroje (0-6) V; |
| INST:SEL P25V | nastaví napájecí zdroj pro zadávání parametrů a měření na hladině zdroje (0-25) V; |
| VOLT xV | nastaví napětí na příslušné hladině zdroje (x – je hodnota ve voltech, x může být reálné číslo např. 5.6643V, případně lze za hodnotou specifikovat přímo jednotku: V, mV); |
| CURR xA | nastaví proud na příslušné hladině zdroje (x – hodnota v ampérech, případně lze za hodnotou specifikovat přímo jednotku: A, mA); |
| OUTPUT ON | uvede všechny zdroje do aktivního stavu (připojí je k výstupním svorkám); |
| OUTPUT OFF | uvede všechny zdroje do neaktivního stavu (odpojí je od výstupních svorek). |

Příkazy pro všechny měřicí přístroje:

| | |
|--------------------|--|
| *RST | restartuje měřicí přístroj; |
| *IDN? | vrátí inicializační řetězec měřicího přístroje; |
| *WAI | vyšle do měřicího přístroje dotaz, který je potvrzen po dokončení operace (čekej a pokračuj, wait and continue); |
| MEAS:VOLT? | změří napětí na nastaveném přístroji (zdroj nebo voltmetr); |
| MEAS:CURRE? | změří proud na nastaveném přístroji; |

Příkazy se používají tak, že je v daném bloku měřicího přístroje zadáme s klíčovým slovem *write*, které znamená, aby se tento příkaz zaslal do přístroje a vykonal. Pro přečtení hodnoty z měřicího přístroje použijeme klíčové slovo *read* a proměnou, do které se má daná hodnota uložit. Na konci každého příkazu musí být klíčové slovo *EOL*, označující konec příkazu. Příklady použití kompletních příkazů jsou umístěny v programu zobrazeném v příloze 3.

6 Laboratorní pracoviště

6.1 Návrh celkového zapojení laboratorního pracoviště

V předchozích kapitolách jsem rozebíral jednotlivé části celého laboratorního pracoviště. V této kapitole se zaměřím na propojení jednotlivých bloků, jak nám je ukazuje obr. 1.1.

Nejprve začnu propojením mezi měřicí částí a měřeným tranzistorem, který je součástí termostatu. Toto spojení je velmi jednoduché, za použití obyčejných propojovacích kabelů, které jsou běžně v laboratořích používány. Protože měřicí tranzistor bude umístěn uvnitř termostatu a ten je uzavřen v krabici, musí se všechny tři vývody tranzistoru vyvést ven z krabičky a to na konektory, do kterých se připojí propojovací kabely.

Další spojení je mezi PC a blokem nazvaným Řízení, regulace a komunikace s PC. Z krabičky, ve které je tento řídicí blok umístěn, je vyveden USB konektor typu B. V počítači je umístěn konektor USB typu A, propojení bude vytvořeno pomocí kabelu, který má požadované konektory.

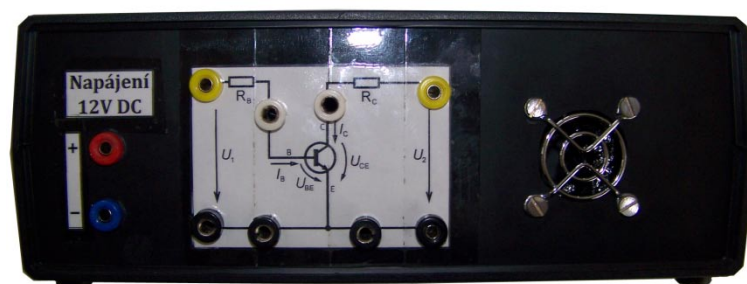
Všechno ostatní je umístěno v krabici. Ta obsahuje desku plošných spojů navrženou v kap. 4.4.2 a termostat navržený v kap. 3.3. Krabice je plastová a zcela vyhovuje požadavkům na tento laboratorní přípravek. Fotografie již sestrojené krabičky jsou na obr. 6.1, 6.2 a 6.3.



Obr. 6.1 Fotografie laboratorního přípravku zepředu.



Obr. 6.2 Fotografie laboratorního přípravku zezadu.



Obr. 6.3 Fotografie čelního panelu laboratorního přípravku.

6.2 Popis činnosti laboratorního pracoviště

Uživatel na začátku měření připojí měřicí přístroje k počítači pomocí rozhraní USB. Pak připojí krabičku s přípravkem s počítačem a také s měřicími přístroji. Poté zapne obslužný program *Mereni 001* ve VEE a přes program FLIP nahraje do mikrokontroléru firmware s požadovanou teplotou. Ještě před spuštěním samotného programu *Mereni 001*, musí uživatel v tomto programu nastavit, pro jakou teplotu měří. Pak stačí spustit program a počkat než se vše doměří. Po té opakuje postup pro různé teploty.

6.3 Návod pro měření

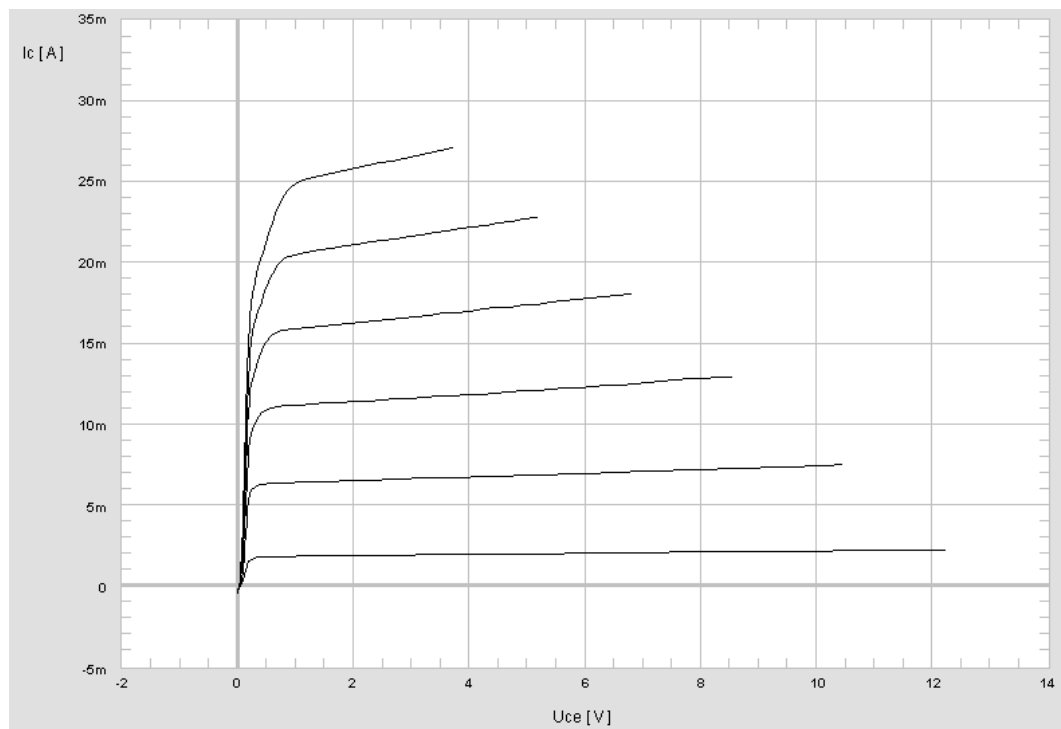
V návodě, který je v příloze 4, je uveden podrobný popis a postup měření, který má sloužit jako podklad pro laboratorní úlohu laboratorního cvičení předmětu Radioelektronická měření.

7 Výsledky měření

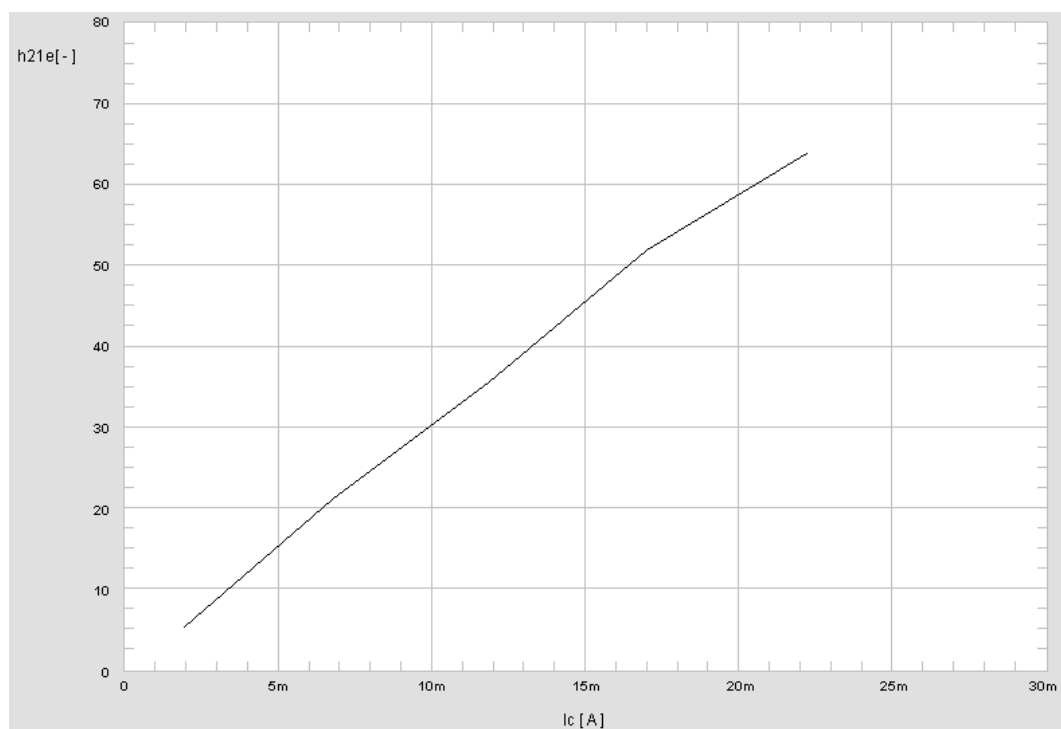
Měření jsem prováděl na polovodičovém tranzistoru BC549B pro teploty 25 až 90 °C. Měřil jsem výstupní voltampérovou charakteristiku pro proudy I_B nabývacích hodnot 9,6 μA, 26 μA, 42,5 μA, 59 μA a 92 μA. A také jsem měřil závislost h_{21e} na I_C při $U_{CE} = 4$ V.

Výsledky měření jsou zobrazeny pouze v grafech kvůli přehlednosti a seřazeny podle teploty. U každé teploty je uveden graf výstupní charakteristiky měřeného tranzistoru a závislost parametru h_{21e} na I_C . Pro větší přehlednost je výsledek pro každou teplotu uveden na samostatné stránce.

7.1 Výsledky měření pro teplotu 25°C:

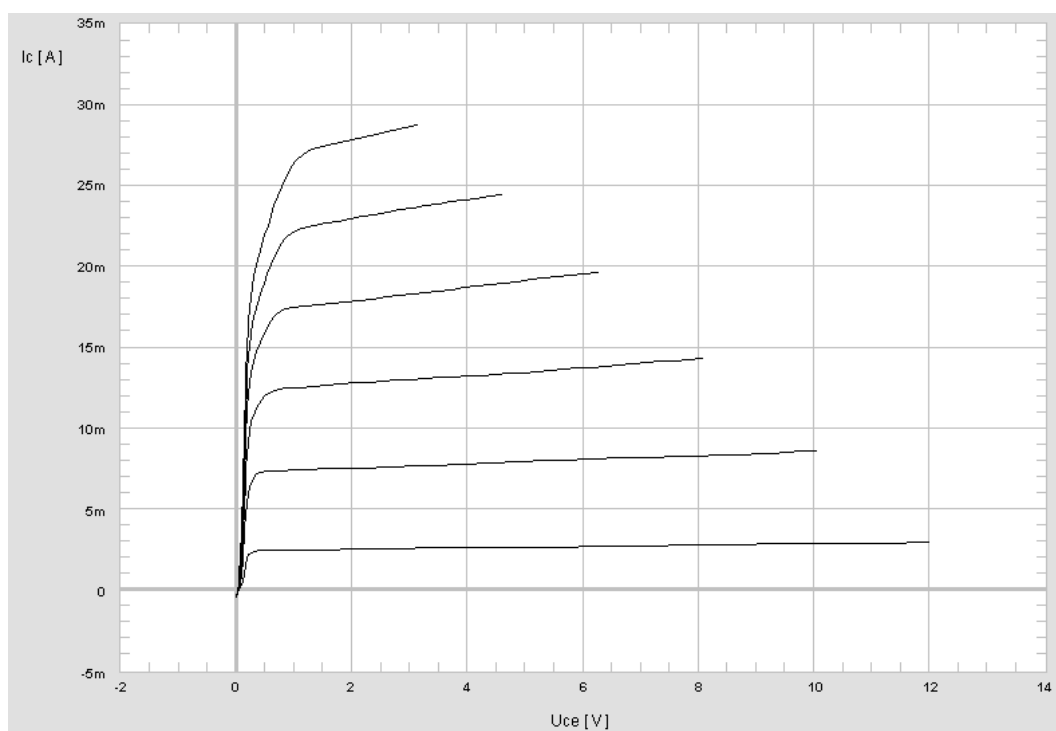


Obrázek 7.1 Výstupní charakteristika tranzistoru.

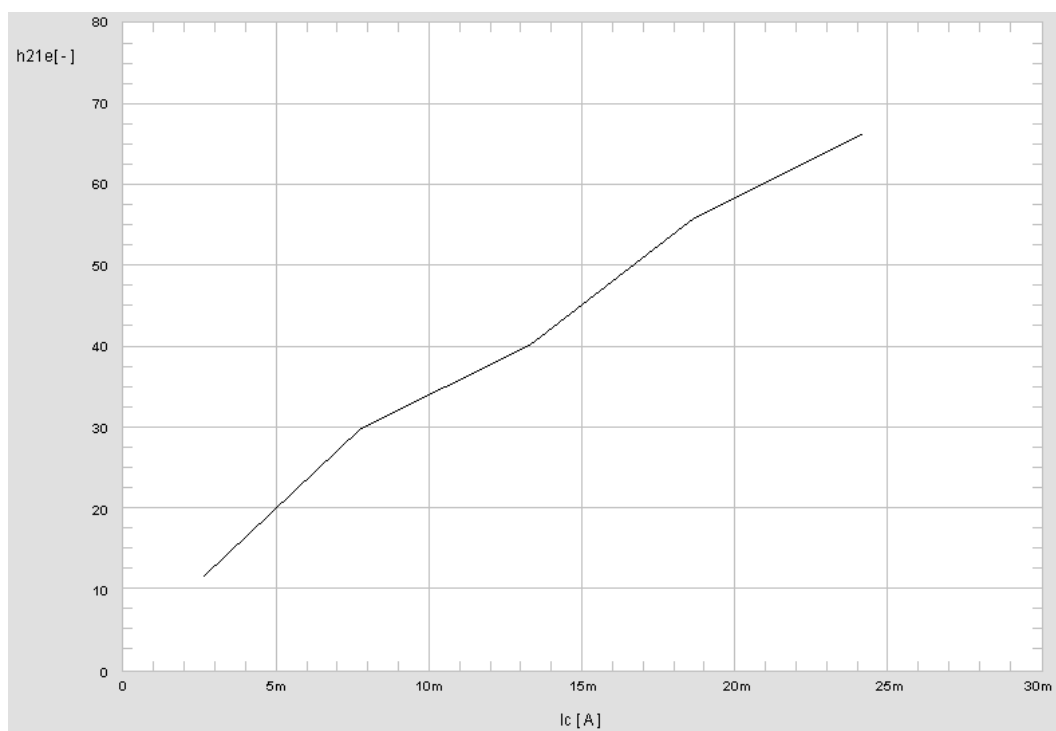


Obrázek 7.2 Závislost h_{21e} na I_C .

7.2 Výsledky měření pro teplotu 35°C:

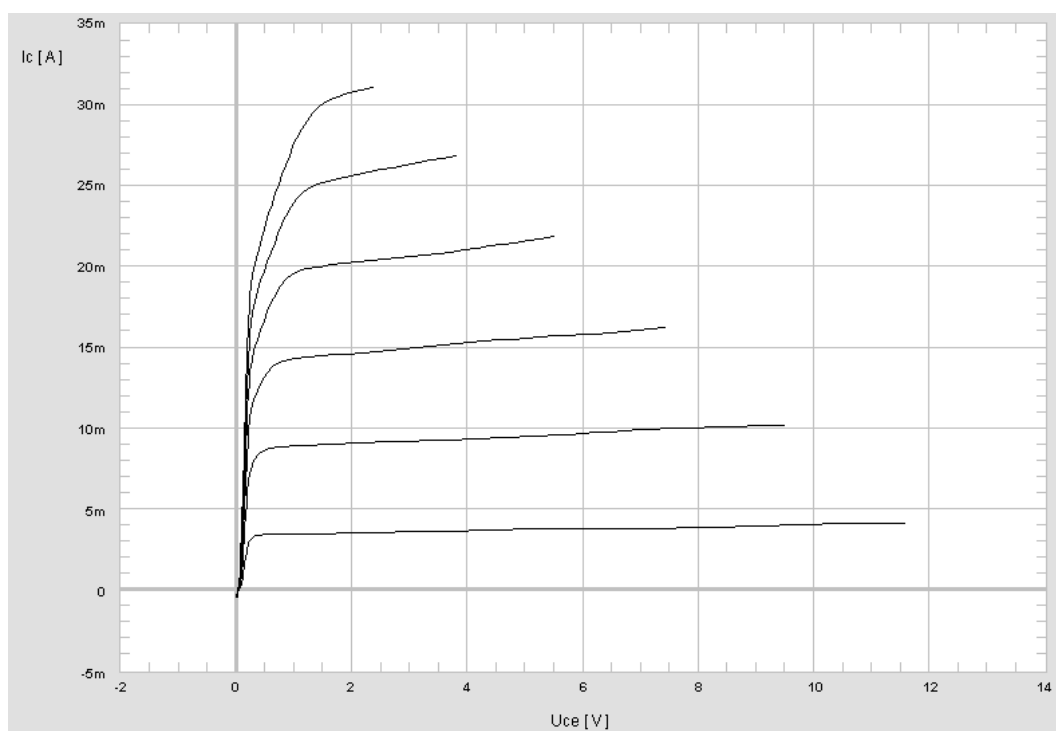


Obrázek 7.3 Výstupní charakteristika tranzistoru.

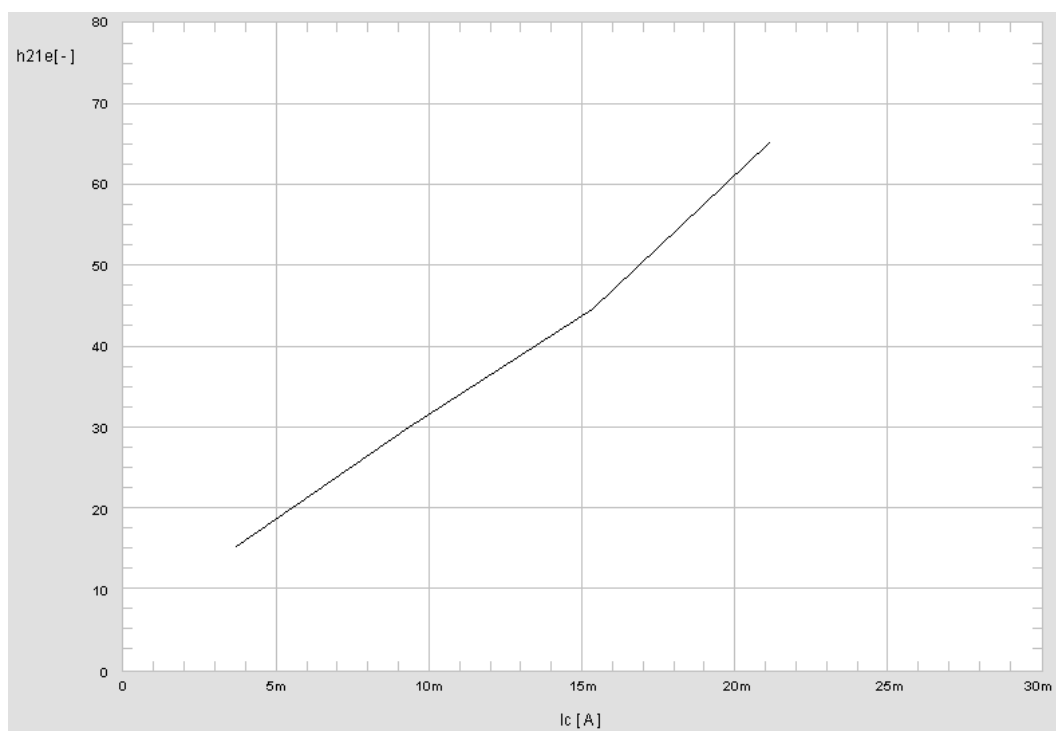


Obrázek 7.4 Závislost h_{21e} na I_C .

7.3 Výsledky měření pro teplotu 50°C:

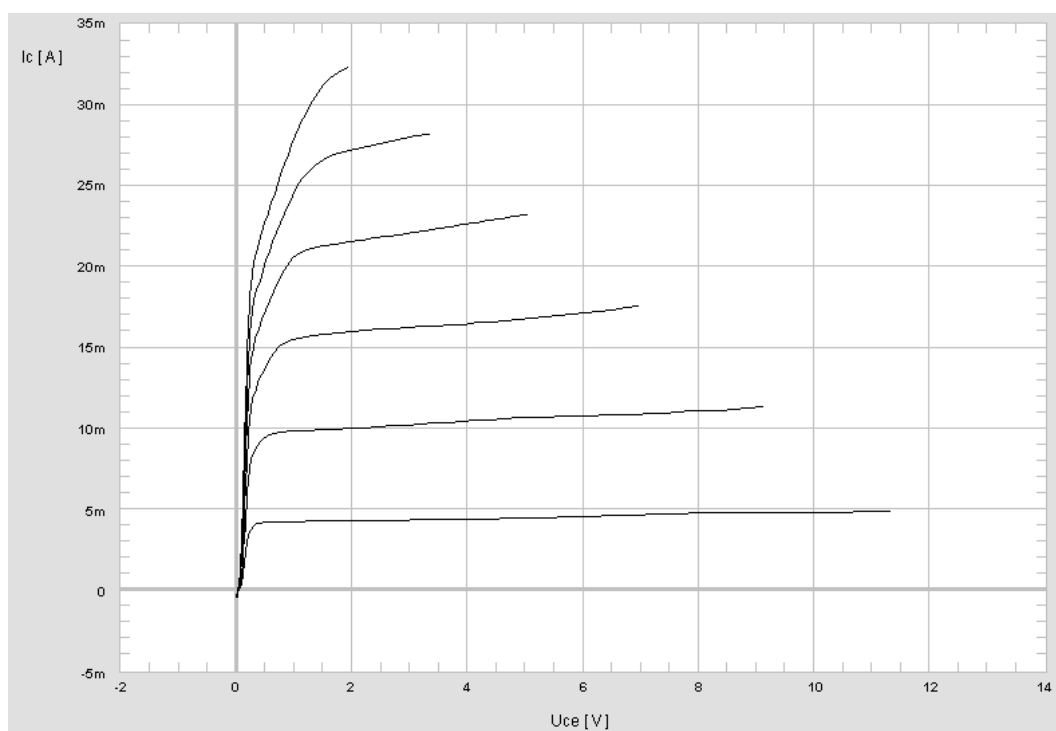


Obrázek 7.5 Výstupní charakteristika tranzistoru.

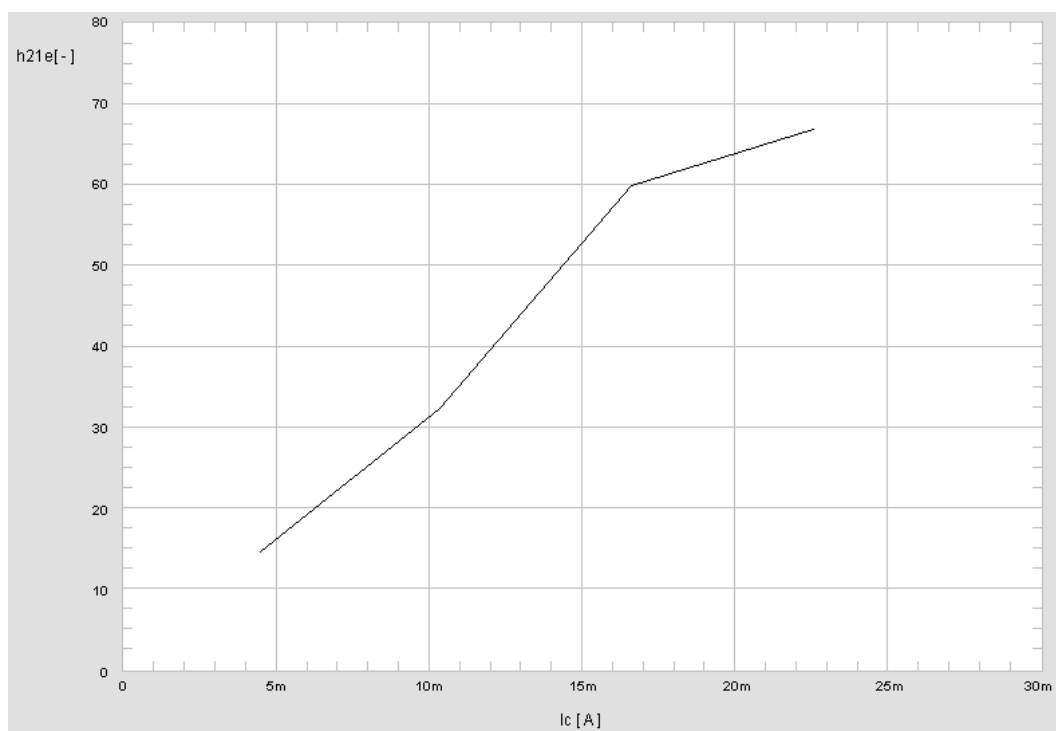


Obrázek 7.6 Závislost h_{21e} na I_C .

7.4 Výsledky měření pro teplotu 60°C:

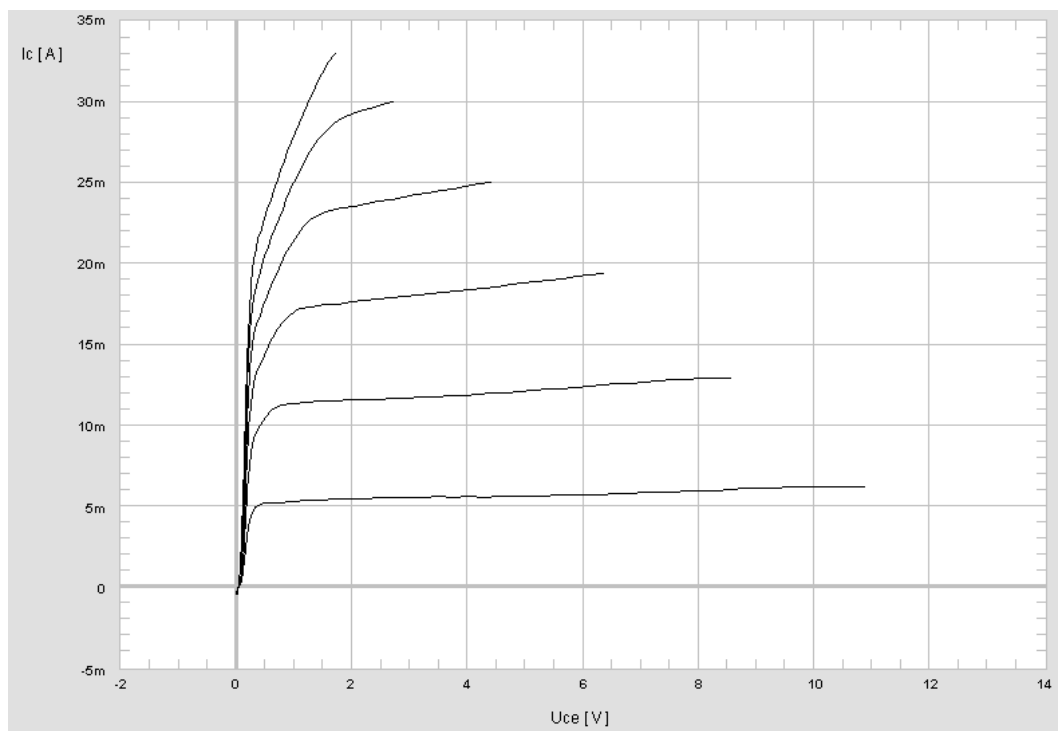


Obrázek 7.7 Výstupní charakteristika tranzistoru.

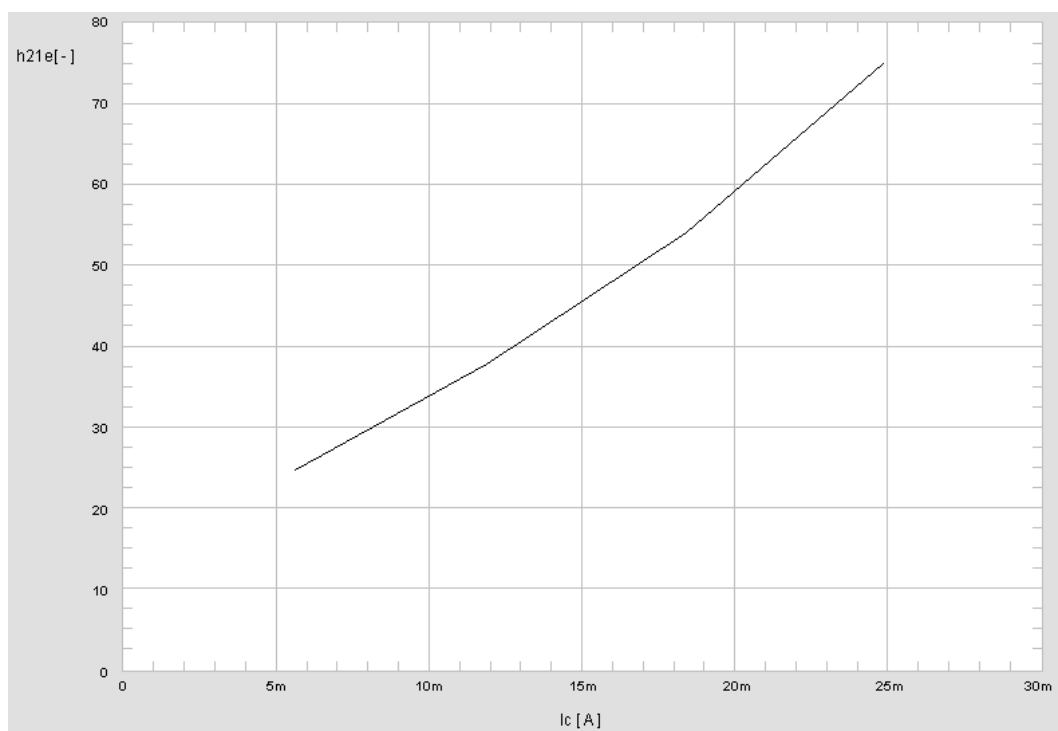


Obrázek 7.8 Závislost h_{21e} na I_c .

7.5 Výsledky měření pro teplotu 75°C:

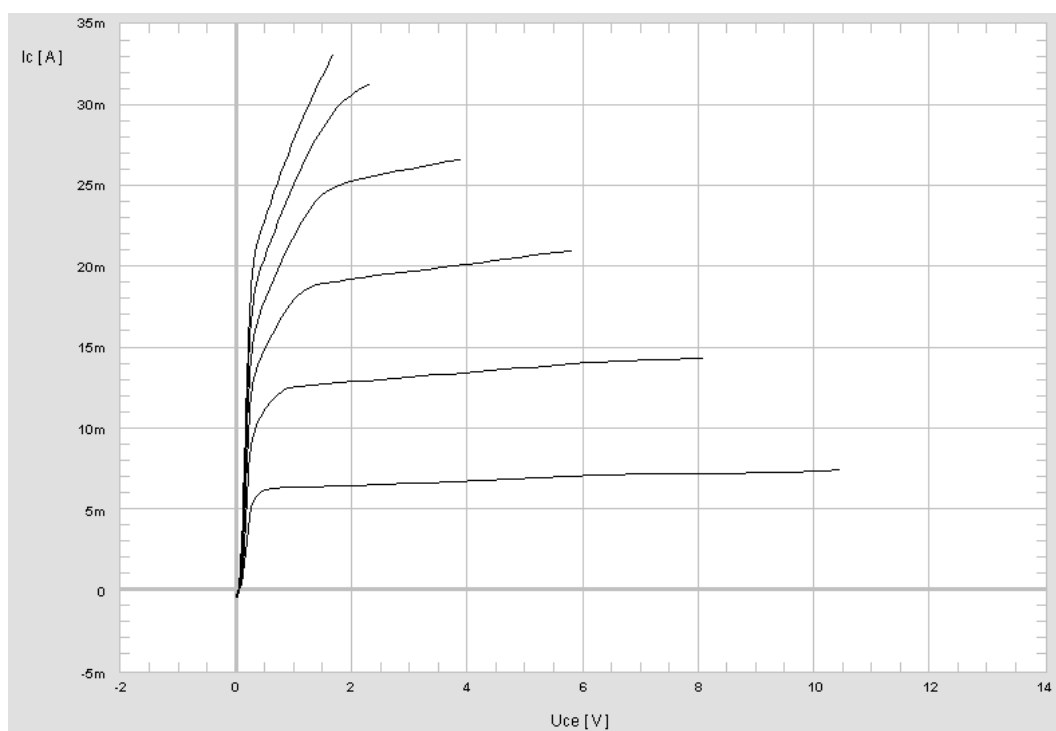


Obrázek 7.9 Výstupní charakteristika tranzistoru.

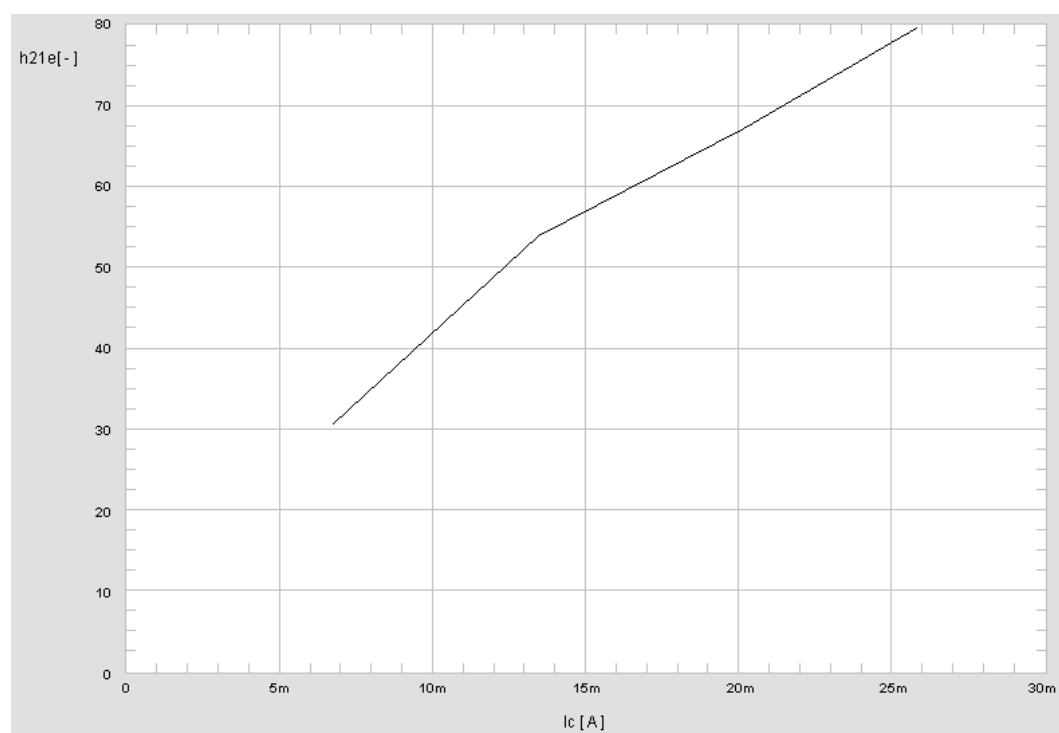


Obrázek 7.10 Závislost h_{21e} na I_C .

7.6 Výsledky měření pro teplotu 90°C:



Obrázek 7.11 Výstupní charakteristika tranzistoru.



Obrázek 7.12 Závislost h_{21e} na I_C .

8 Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval návrhem a realizací laboratorního pracoviště, které bude sloužit k měření závislosti teploty na výstupních parametrech tranzistoru. Návrh celého pracoviště jsem rozdělil do několika částí a každou část samostatně popsal a navrhl její konkrétní provedení. V každé kapitole je uveden teoretický předpoklad a požadavky na danou část pracoviště a následně je navrženo řešení i s možnými problémy, které se mohou vyskytnout. Podle požadavků zadání jsem celé pracoviště zrealizoval, odzkoušel a provedl měření. Bohužel se mi nepodařilo propojit laboratorní přípravek s počítačem přes rozhraní USB, jak bylo požadováno v zadání. Tento problém jsem vyřešil tím, že se zadávají teploty ručně přímo do mikrokontroléru místo posílání těchto dat přes rozhraní USB mezi ovládacím prostředím VEE a mikrokontrolérem. Přesto celé mnou navržené pracoviště funguje podle zadání a lze na něm bez obtíží téměř automatizovaně měřit díky programu v prostředí VEE.

Dalším cílem bakalářské práce bylo změřit polovodičovou součástku a ověřit její stálost parametrů při různých teplotách. Měření prokázalo předpoklady, že vlastnosti polovodičové součástky se měnily s teplotou. Zvláště pak se zvyšující se teplotou se razantně zvyšoval proud I_C a následně i parametr h_{21e} , při zachování stejných napětí na tranzistoru. Dále jsem ověřil, že závislost parametru h_{21e} na I_C je lineární, ale při teplotách vyšších než 60 °C přestává být závislost lineární. Všechny výsledky měření jsou popsány v kap. 7.

9 Seznam literatury

- [1] WIKIPEDIE. *Teorie Polovodičů* [online]. [cit. 10. prosince 2008]. Dostupný z WWW: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D> >.
- [2] GM ELECTRONIC. *Katalog součástek GM electronic* [online]. [cit. 12. prosince 2008]. Dostupný z WWW: < http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/210/210-031/dsh.210-031.1.pdf >.
- [3] SOU TECHNICKÉ CHOTĚBOŘ. *Výpočet ztrátového tepla* [online]. [cit. 30. května 2009]. Dostupný z WWW: < <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf> >.
- [4] WIKIPEDIE. *Universal Serial Bus* [online]. [cit. 12. prosince 2008]. Dostupný z WWW: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/USB> >.
- [5] ATMEL. *Dokumentace k AT90USB1287* [online]. [cit. 30. května 2009]. Dostupný z WWW: < http://www.atmel.com/dyn/Products/product_card.asp?part_id=3875 >.
- [6] ATMEL. *Dokumentace k AVR Studio 4* [online]. [cit. 30. května 2009]. Dostupný z WWW: < http://www.atmel.com/dyn/Products/tools_card.asp?tool_id=2725 >.
- [7] ATMEL. *Dokumentace k AVR-GCC* [online]. [cit. 30. května 2009]. Dostupný z WWW: < <http://winavr.sourceforge.net/index.html> >.
- [8] ATMEL. *Dokumentace k programu FLIP* [online]. [cit. 30. května 2009]. Dostupný z WWW: < http://www.atmel.com/dyn/Products/tools_card.asp?tool_id=3886 >.
- [9] ČEJKA, M., MATYÁŠ, V. *Elektronická měřicí technika*. Brno: Vutium 1999. 141 s. ISBN:80-214-1336-0.
- [10] KAINKA, B. *Měření, řízení a regulace pomocí PC*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. 272 s. ISBN 80-7300-089-X.

10 Seznam příloh

Příloha 1 Ukázka zdrojového kódu pro mikrokontrolér.

Příloha 2 Schéma zapojení obvodu na desce prošlých spojů.

Příloha 3 Ukázka programu *Mereni 001*.

Příloha 4 Podrobný popis a postup měření.

11 Seznam zkratek

| | |
|-----------|--|
| A/D | analogově číslicový (analog/digital) |
| B | báze (base) |
| C | kolektor (collector) |
| D- | datový vodič rozhraní USB |
| D/A | číslicově analogový (digital/analog) |
| D+ | datový vodič rozhraní USB |
| E | emitor (emitter) |
| EAGLE | návrhový systém pro desky plošných spojů (easily applicable graphical layout editor) |
| EEPROM | elektricky smazatelná programovatelná paměť typu ROM (electrically erasable programmable read-only memory) |
| EOL | konec řádu (end of the line) |
| DIL | druh pouzdra polovodičových součástek (dual in-line package) |
| DPS | deska plošných spojů |
| FLASH | nevolatilní paměť typu flash |
| GND | signálová zem rozhraní USB |
| GPIO | rozhraní univerzálních měřicích přístrojů (General Purpose Interface Bus) |
| h_{11e} | vstupní odpor při výstupu nakrátko |
| h_{12e} | zpětný napěťový zesilovací činitel při vstupu naprázdno |
| h_{21e} | proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko |
| h_{22e} | výstupní vodivost při vstupu naprázdno |
| I/O | vstupně výstupní (input/output) |
| I_B | proud báze |
| I_{BM} | špičkový proud báze |
| I_C | kolektorový proud |
| I_{CB0} | proud tekoucí mezi bází a kolektorem při odpojení emitoru |
| I_{CM} | špičkový proud kolektoru |
| I_E | emitorový proud |
| LAN | místní počítačová síť (local area network) |
| PC | osobní počítač (personal computer) |
| P_{TOT} | celkový vyzářený výkon při $T_{AMB} \leq 25\text{ °C}$ |
| R_B | rezistor v bázi u měřeného tranzistoru |
| R_C | rezistor v kolektoru u měřeného tranzistoru |
| RAM | paměť s náhodným přístupem (random access memory) |
| RISC | počítač s redukovanou instrukční sadou (reduced instruction set computing) |
| ROM | paměť pouze pro čtení (read-only memory) |
| T_{AMB} | pracovní teplota okolí |
| T_J | teplota přechodu |
| TQFP | druh pouzdra mikročipu pro povrchovou montáž (thin quad flat pack) |
| T_{STG} | skladovací teplota |
| TTL | standard používaný digitální integrované obvody (transistor-transistor logic) |
| U_1 | napětí zdroje, které nastavuje napětí U_{BE} |

| | |
|-----------|--|
| U_2 | napětí zdroje, které nastavuje napětí U_{CE} |
| U_{BE} | napětí mezi bází a emitorem |
| U_{BEO} | napětí kolektor-báze při otevřeném emitoru |
| U_{BEO} | napětí báze-emitor při otevřeném kolektoru |
| U_{CE} | napětí mezi kolektorem a emitorem |
| U_{CEO} | napětí kolektor-emitor při otevřené bázi |
| USART | univerzální asynchronní vysílač a přijímač (universal asynchronous receiver/transmitter) |
| USB | univerzální sériová sběrnice (universal serial bus) |
| VEE | Virtuální inženýrské prostředí (Visual Engineering Environment) |
| VCC | napájecí napětí rozhraní USB |

Příloha 1 Ukázka zdrojového kódu pro mikrokontrolér

```
#include <avr/io.h>
#include <math.h>

int AD_Conv;
float Req_Temp, Act_Temp;

#define TurnOn_Transistor    PORTD = 0xf0;
#define TurnOff_Transistor   PORTD = 0x00;
#define TurnOn_Fan           PORTC = 0xff;
#define TurnOff_Fan          PORTC = 0x00;

int main(void)
{
    //Počáteční podmínky
    DDRC = 0xff;
    DDRD = 0xff;
    TurnOff_Transistor;
    TurnOff_Fan;

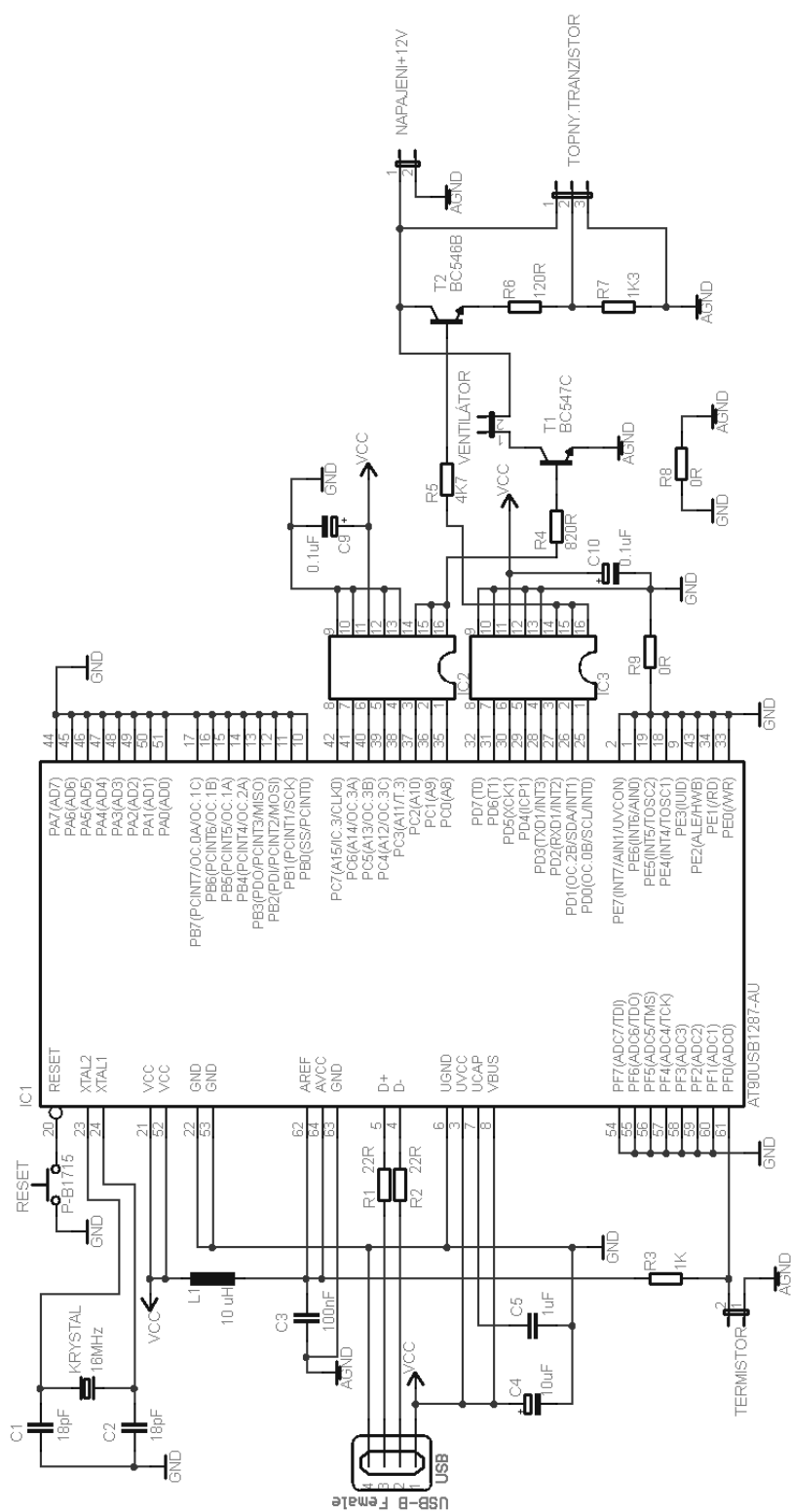
    //Požadovaná teplota****
    Req_Temp = 90.00;
    //*****

    AD_Conv = 0;
    Act_Temp = 0;
    ADMUX = (1<<REFS0);
    ADCSRA = (1<<ADEN)((1<<ADSC)((1<<ADPS2)((1<<ADPS1)((1<<ADPS0);

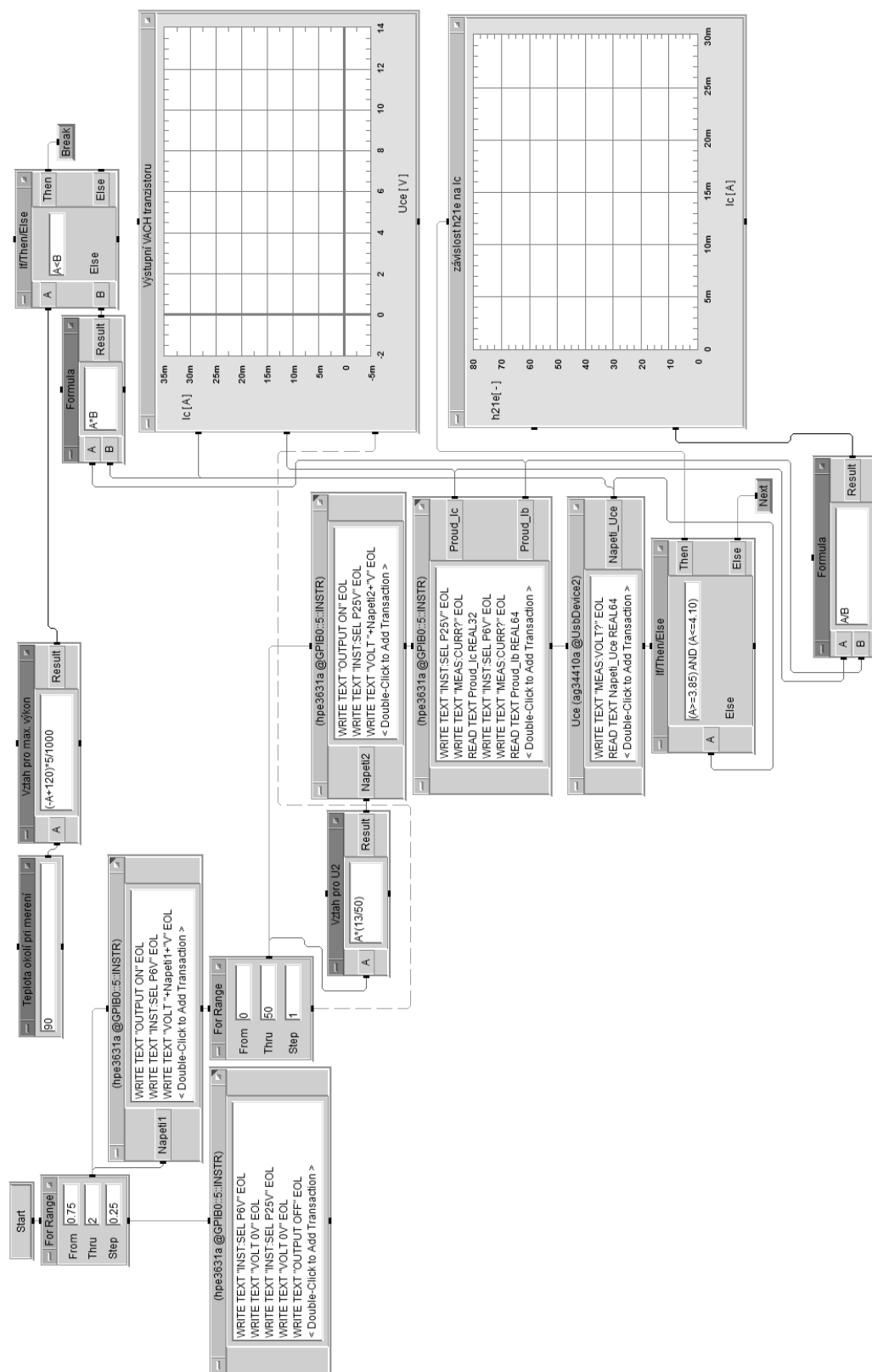
    while(1) //Nekonečná smyčka, ve které běhá MCU
    {
        ADCSRA |= (1<<ADSC);
        while(ADSC == 1){};
        AD_Conv = ADCL;
        AD_Conv += (ADCH << 8);
        Act_Temp = AD_Conv * 5.0 / 1023;
        Act_Temp = Act_Temp * 1000 / ( 5.0 - Act_Temp);
        Act_Temp = (3977 / (log(Act_Temp / 4700) + (3977 / 298.0))) - 273.0;

        if (Req_Temp < Act_Temp)
        {
            TurnOff_Transistor;
            TurnOn_Fan;
        }
        else if (Req_Temp > Act_Temp)
        {
            TurnOff_Fan;
            TurnOn_Transistor;
        }
        else
        {
            TurnOff_Transistor;
            TurnOff_Fan;
        }
    }
}
```

Příloha 2 Schéma zapojení obvodu na desce prošlých spojů



Příloha 3 Ukázka programu *Mereni 001*



Příloha 4 Podrobný popis a postup měření

Automatické měření vlivu teploty na tranzistor

Zadání laboratorní úlohy

- 1) Seznamte se s laboratorním přípravkem, na kterém budete provádět měření a zprovozněte ho.
- 2) Sestavte program ve VEE, kterým budete měřit výstupní charakteristiku tranzistoru a závislost parametru h_{21e} na I_C . (Jako vzor může sloužit ukázka programu z přílohy 3.) Součástí tohoto programu musí být taky kontrola, aby nedošlo k překročení hodnoty P_{TOT} .
- 3) Proveďte měření zadaných charakteristik pro teploty 25, 35, 50, 60, 75 a 90 °C.

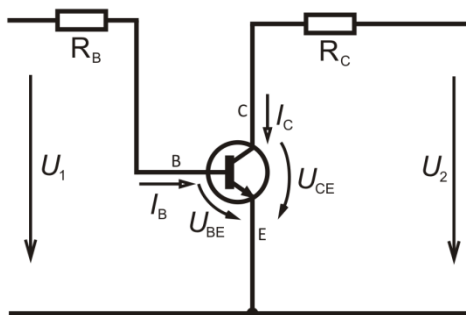
Teoretický úvod

Měření výstupní voltampérové charakteristiky a závislosti h_{21e} na I_C se bude provádět na tranzistoru BC549B. Což je typický NPN tranzistor, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Parametrů tranzistoru BC549B.

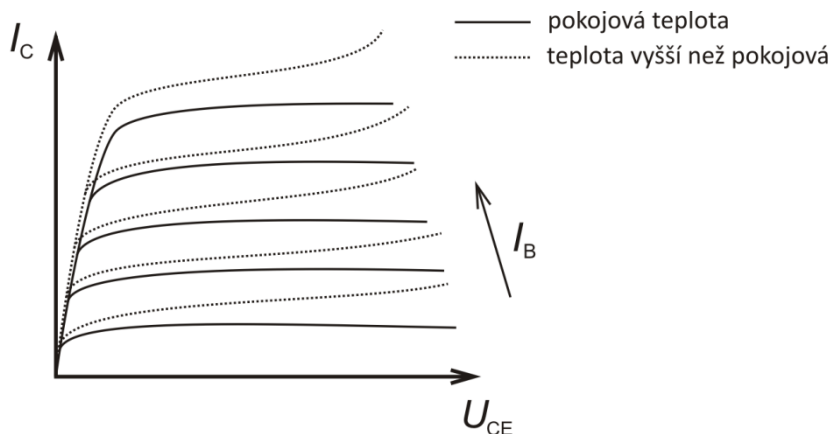
| Symbol | Parametr | Podmínka | Min. | Max. | Jednotka |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|------|------|----------|
| U_{BEO} | napětí kolektor-báze | otevřený emitor | - | 30 | V |
| U_{CEO} | napětí kolektor-emitor | otevřená báze | - | 30 | V |
| U_{BEO} | napětí báze-emitor | otevřený kolektor | - | 5 | V |
| I_C | stejnoseměrný proud kolektoru | | - | 100 | mA |
| I_{CM} | špičkový proud kolektoru | | - | 200 | mA |
| I_{BM} | špičkový proud báze | | - | 200 | mA |
| P_{TOT} | celkový vyzářený výkon | $T_{AMB} \leq 25\text{ °C}$ | - | 500 | mW |
| T_{STG} | skladovací teplota | | -65 | 150 | °C |
| T_J | teplota přechodu | | - | 150 | °C |
| T_{AMB} | pracovní teplota okolí | | -65 | 150 | °C |

Tyto hodnoty budou sloužit k nastavení mezních hodnot měření. K měření bude sloužit laboratorní přípravek, který umí nastavit požadovanou teplotu a tuto teplotu udržovat po celou dobu měření. Měřený tranzistor a vyznačené veličiny jsou uvedeny na obr. 1.



Obr. 1 Schéma zapojení BC549B.

Z teorie polovodičů víme, že vlastnosti polovodičových součástek jsou závislé na teplotě. Se zvyšující se teplotou se také zvyšuje vlastní vodivost polovodiče a tím se zvyšují proudy tekoucí tranzistorem. Tím se zvyšuje i hodnota h_{21e} . Se zvyšující teplotou je také nutné kontrolovat, zda není překročena hodnota dovolené kolektorové ztráty P_{TOT} . Jak se projeví vliv teploty na parametry tranzistoru ne načrtnuto na obr. 2.



Obr. 2 Vliv teploty na parametry tranzistoru.

Postup měření

Ad. 1)

Připojte přípravek pomocí USB kabelu k počítači. Dále stejnosměrným zdrojem napětí o velikosti 12 V připojte napájení pro laboratorní přípravek. V počítači spusťte program FLIP, kterým budete nahrávat firmware s požadovanou teplotou do mikrokontroléru. Nakonec připojte měřicí přístroje k počítači a také k laboratornímu přípravku, schéma měřeného tranzistoru je uvedeno na přípravku.

Ad. 2)

Pomocí *Instrument manager...*, jenž je umístěn v menu *I/O*, zkontrolujte, zdali jsou správně připojeny všechny měřicí přístroje (napájecí zdroj Agilent E3631A a dva voltmetry Agilent 34410A). Pro samotnou realizaci zadání a měření charakteristik tranzistoru bude třeba využít následujících příkazů:

- ***RST** – restartuje měřicí přístroj;
- ***IDN?** – vrátí inicializační řetězec měřicího přístroje;
- ***WAI** – vyšle do měřicího přístroje dotaz, který je potvrzen po dokončení operace (čekej a pokračuj, wait and continue);
- **MEAS:VOLT?** – změří napětí na nastaveném přístroji (zdroj nebo voltmetr);
- **MEAS:CURRE?** – změří proud na nastaveném přístroji;
- **INST:SEL P6V** – nastaví napájecí zdroj pro zadávání parametrů a měření na hladině zdroje (0-6) V;
- **INST:SEL P25V** – nastaví napájecí zdroj pro zadávání parametrů a měření na hladině zdroje (0-25) V;
- **VOLT xxxV** – nastaví napětí na příslušné hladině zdroje (xxx – je hodnota ve voltech, xxx může být reálné číslo např. 5.6643V, případně lze za hodnotou specifikovat přímo jednotku: V, mV);

- **CURR xxxA** – nastaví proud na příslušné hladině zdroje (xxx – hodnota v ampérech, případně lze za hodnotou specifikovat přímo jednotku: A, mA);
- **OUTPUT ON** – uvede všechny zdroje do aktivního stavu (připojí je k výstupním svorkám);
- **OUTPUT OFF** – uvede všechny zdroje do neaktivního stavu (odpojí je od výstupních svorek).

Pro toto měření je vhodné využít smyčky *For Range*, kterými můžeme zajistit určitý počet opakování po určitém kroku, jsou vhodné pro nastavování napětí. Pokud je potřeba něco porovnat a podle toho se rozhodnout, k tomu slouží blok *If/then/else*. Další důležité bloky jsou *Break*, který provede opuštění dané smyčky, a blok *Next*, který přeskočí na začátek smyčky s další hodnotou. Pro vykreslování grafu je vhodné použít blok *X vs Y Plot*. Pro měření charakteristik je důležité, aby po vykreslení jedné křivky začal graf při dalším měření vykreslovat novou křivku. To se provede tak, že kliknete na blok *X vs Y Plot* pravým tlačítkem myši a vyberete *Add Terminal -> Control Input...* poté vyberete položku *Next Curve*. Tento nový vstup připojte na výstup smyčky *For Range*, která zajišťuje měření jedné charakteristiky.

Ad. 3)

Po sestavení měřicího programu přistoupíme k samotnému měření. V programu FLIP klikneme na ikonku konektoru USB s kabelem a vybereme položku USB. Poté stiskneme na přípravku tlačítko restart a podržíme asi 1 s. Po uvolnění počkáme přibližně 1 s a v programu FLIP stiskem tlačítko *Open*. Mělo by dojít k navázání spojení s přípravkem. Pokud se to nepovede, zkoušejte znova. Chce to přesné načasování. Poté co se komunikace navázala, vyberte položku *File -> Open HEX File...* a vyberte příslušný firmware pro požadovanou teplotu. Otevřete ho a zaškrtněte všechny 4 checkboxy na levé straně okna programu. Klikněte na *Run* a dojde k nahrání firmware. Poté klikněte na *Start application*. Poté stačí vytáhnout a znovu zastrčit USB kabel, který je připojený k přípravku. Nyní dojde k nastavení teploty a jejímu udržování na vámi zvolené hodnotě. Že teplota v termostatu dosáhla požadované hodnoty, poznáte tak, že pokud jste zvyšovali teplotu, je teplota dosažena v okamžiku, kdy se spustí ventilátor a pokud snižujete teplotu, tak k nastavení dojde při vypnutí ventilátoru. Dalšího vypínání a zapínání ventilátoru si nevšímejte, jedná se o spínání kvůli udržení konstantní teploty. Poté můžete spustit program pro měření tranzistoru.

Tento postup z bodu 3 opakuje pro všechny zadané teploty.

Literatura

- [1] Agilent Technologies, *VEE Pro Help (součást programového prostředí VEE 8.)*.
- [2] Agilent Technologies, *Agilent E3631A Triple Output DC Power Supply, User's Guide*. [online], [cit. 2008-3-3]. Dostupné z <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E3631-90002.pdf>>.
- [3] Agilent Technologies, *Agilent 34410A/11A 6½ Digit Multimeter, User's Guide*. [online], [cit. 2008-3-3]. Dostupné z <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34410-90001.pdf>>.
- [4] Atmel Corporation, *FLIP, Application Note*. [online], [cit. 2009-28-5]. Dostupné z <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7769.pdf>.